

# INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018,  
publicado en el Diario Oficial de la Federación el 29 de noviembre de 1976.

---

Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano

MAESTRÍA EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES



*Caracterización de la subcuenca del Guayabo para el aprovechamiento  
de agua pluvial en el desarrollo urbano en la Zona Metropolitana de  
Guadalajara*

Trabajo recepcional que para obtener el grado de  
MAESTRO EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES

Presenta: Antonio Aguilera Cortés  
Tutor: Óscar Humberto Castro Mercado

Tlaquepaque, Jalisco, 8 de diciembre de 2015.



(Monet, Claude, 1897)

## Contenido

Resumen.....	6
1. Antecedentes .....	7
1.1 La insustentabilidad hídrica de la Zona Metropolitana de Guadalajara .....	7
1.2 Sistema hidrológico local.....	15
1.2.1 Cuenca, subcuenca y microcuenca .....	15
1.2.2 Clasificación hidrológica oficial del territorio .....	16
1.2.3 La Cuenca del Ahogado .....	18
1.2.4 La subcuenca del Guayabo .....	20
1.3 Ordenamiento territorial en la ZMG .....	29
2. Justificación .....	31
3. Objetivos .....	32
4. Hipótesis de la investigación .....	33
5. Marco teórico.....	34
5.1 Postura epistemológica .....	34
5.2 Perspectiva teórica .....	34
5.3 El metabolismo del agua en la planeación urbana .....	37
Definición del Metabolismo del Agua .....	37
6. Estado del Arte .....	39
6.1 Gestión del agua.....	39
6.1.1 Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) .....	39
6.1.2 Propuesta de Arturo Gleason hacia una gestión sustentable del agua en la ZMG ...	39
6.1.3 Un nuevo enfoque de gestión de cuencas hidrográficas .....	40
6.1.4 Manejo del agua de acuerdo a “un nuevo paradigma del agua” .....	40
6.2 Regulaciones y certificaciones.....	41

6.2.1	Manejo de escorrentía en edificios .....	41
6.2.2	DUIS .....	47
6.2.3	Living Building Challenge 2.0.....	47
6.3	Criterios de riesgo asociados a la escorrentía urbana .....	48
6.4	Tecnologías alternativas de manejo de agua .....	51
6.4.1	SuDS / WSUD / BMP .....	51
6.4.2	Low Impact Development (LID).....	52
6.4.3	Humedales artificiales (reed bed systems) .....	53
6.4.4	Biodigestores.....	54
6.4.5	Planta de tratamiento de aguas residuales dual, con separación de las aguas jabonosas o grises y de las aguas negras (Patente solicitada WO 2008120963 A1).....	54
6.4.6	Recolección doméstica de agua pluvial.....	56
6.4.7	Sistema Integral de Abasto y Saneamiento de Agua con descarga cero (SIASA-0)..	57
6.4.8	Sistema Unitario de Tratamiento y Reuso de Aguas, Nutrientes y Energía de Xochicalli (SUTRANE-1970).....	58
7.	Descripción de la metodología.....	59
7.1	Diseño de instrumentos de intervención .....	59
7.1.1	Recorrido crítico (visita de campo) .....	59
7.1.2	Análisis geo-sociodemográfico inferencial.....	60
7.1.3	Caracterización hidrológica por afluentes a distintos órdenes.....	61
7.1.4	Análisis diferencial del territorio .....	63
8.	Desarrollo de la Investigación .....	64
8.1	Acciones estratégicas en la escala regional .....	65
8.1.1	Organización del territorio .....	65
8.1.2	Límites de crecimiento .....	70
8.1.3	Zonificación .....	72
8.1.4	Diagnóstico del funcionamiento hidrológico de la subcuenca del Guayabo .....	87
8.1.5	Densidad de edificación .....	90
8.1.6	Acciones prioritarias.....	91
8.1.7	Estrategias de implementación .....	101
8.2	Acciones estratégicas en las escalas barrial y vecinal .....	102
8.2.1	Integración de infraestructura verde de drenaje pluvial en el territorio.....	102



---

8.2.2	Urbanización y diseño de fraccionamientos .....	105
8.3	Acciones estratégicas en la escala de la vivienda .....	108
8.3.1	Prototipo de vivienda y tamaño predios.....	108
8.3.2	Ecotecnias.....	109
9.	Conclusiones .....	111
10.	Recomendaciones .....	117
11.	Índice de Tablas.....	119
12.	Índice de Gráficas .....	120
13.	Anexos .....	122
13.1	Observaciones del recorrido crítico .....	122
13.2	Progresión de la expansión urbana .....	124
13.3	Caracterización hidrológica de afluentes del Arroyo el Guayabo .....	129
13.4	Clima y variables meteorológicas de Tlajomulco .....	131
13.4.1	Clasificación climática .....	132
13.4.2	Temperatura.....	133
13.4.3	Precipitación.....	135
13.5	Cálculo estadístico para estimar la variación de la lluvia anual promedio .....	137
13.6	Cálculo del balance hídrico por el método de Thornthwaite.....	140
13.6.1	Fundamentos teóricos del método .....	140
13.6.2	Cálculo de la evapotranspiración potencial .....	141
13.6.3	Cálculo de la evapotranspiración real y balance hídrico.....	141
14.	Bibliografía .....	143

## Resumen

En la planeación y el desarrollo urbano en la Zona Metropolitana de Guadalajara hasta el día de hoy se ha ignorado de forma consistente el comportamiento hidrológico original del territorio, lo que resulta en inundaciones recurrentes, saturación de la red de drenaje durante las lluvias, bajas tasas de recarga de acuíferos, contaminación y desperdicio de las aguas de lluvia. Este trabajo profundiza en diversas alternativas que contribuyan a conformar un nuevo modelo de planeación urbana que incorpore la hidrología superficial del territorio y la disponibilidad del recurso hídrico. Se toma como objeto de estudio la subcuenca del Guayabo, que es una de las 13 subcuencas que conforman la Cuenca del Ahogado, la cual se ubica al sur-poniente de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Esta subcuenca recibe en promedio más de 70'000,000 de m<sup>3</sup> de agua de lluvia al año, lo que representa un fuerte potencial para su aprovechamiento. Por otro lado la subcuenca está sometida a fuertes presiones de desarrollo urbano en detrimento de sus áreas naturales y de uso agrícola. En este trabajo se utilizan distintas herramientas de análisis territorial e hidrológico con base en plataformas SIG y métodos analíticos de cálculo para determinar entre otras cosas: a) riesgos a los asentamientos, b) afectaciones al funcionamiento hidrológico, c) agotamiento de recursos hídricos, d) alternativas para el manejo integral del agua, e) identificación zonas de recarga, f) definición de densidades máximas de ocupación de suelo con base en objetivos hidrológicos, entre otras.

### Palabras clave:

Planeación urbana y ordenamiento territorial, conservación de la función hidrológica del territorio, manejo integral de los recursos hídricos, organización en cuencas, límite de crecimiento, subcuenca del Guayabo.

## 1. Antecedentes

### 1.1 La insustentabilidad hídrica de la Zona Metropolitana de Guadalajara

Resulta difícil definir un consumo residencial exacto para la Zona Metropolitana de Guadalajara dada la conformación heterogénea del abasto, diferencias numéricas entre diferentes fuentes (López-Ramírez, Mario, Ochoa-García, Heliodoro, 2012) e incongruencia entre ellas, como se discutirá más adelante. Con el propósito de obtener un valor de referencia se consultaron los informes trimestrales del SIAPA, proveedor principal de la ZMG (SIAPA, 2014a, 2014b, 2014c, 2015). En el 2014, de acuerdo con estimaciones del SIAPA, el consumo promedio anual de sus usuarios fue de 203 litros diarios por habitante, como se puede constatar en la tabla siguiente. Estos datos se estimaron bajo el supuesto de 4.23 habitantes/toma domiciliaria de uso doméstico correspondiente a 4'013,923 habitantes.

	<b>T1, 2014</b>	<b>T2, 2014</b>	<b>T3, 2014</b>	<b>T4, 2014</b>	<b>2014</b>
<b>Volumen abasto (M3)</b>	74,341,289	76,455,496	72,448,594	74,157,688	297,403,066
<b>Días del periodo</b>	90	91	92	92	365.00
<b>Suministro por día (M3)</b>	826,014	840,170	787,485	806,062	814,803
<b>Gasto medio (M3/seg)</b>	9.6	9.7	9.1	9.3	9.4
<b>Dotación (l/d/hab) considerando 4'013,923 hab. (marzo 2014)</b>	<b>205.8</b>	<b>209.3</b>	<b>196.2</b>	<b>200.8</b>	<b>203.0</b>

**Tabla 1.** Abasto de agua potable suministrado por el SIAPA durante el 2014 a la Zona Metropolitana de Guadalajara.

Fuente: Elaboración propia a partir de los Informes del SIAPA (SIAPA, 2014a, 2014b, 2014c, 2015)

Compárese este consumo medio por habitante con el que tienen otras ciudades. De acuerdo con el diario El Informador, a su vez basado en datos de la Asociación Internacional del Agua, el consumo por habitante en Bilbao, por ejemplo, es de 109 litros diarios por habitante; en Sevilla, de 122; en Madrid y Berlín, de 130; en Oslo, de 180; en Estocolmo, de 186 y en Londres, de 163 (Informador, El, 2013). Ahora bien, no se puede ignorar que existen diferencias culturales, económicas y climáticas entre las ciudades europeas y las mexicanas que pudieran incidir en estos consumos. Ahora bien, en Monterrey, por citar un caso en nuestro país, es de alrededor de 150 litros diarios por habitante (Pérez-Vega, Ignacio, 2014), lo que pone de manifiesto la factibilidad de reducir el consumo diario local mediante políticas públicas como campañas educativas, incentivos, apoyos económicos, tarifas y regulaciones.

El precio que pagan los usuarios del Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA) está subsidiado para volúmenes menores a 40 m<sup>3</sup>. Un hogar con 4 miembros con una

dotación de 250 litros diarios por persona, utilizará  $30 \text{ m}^3$  en un mes y uno de 5 miembros  $37.5 \text{ m}^3$ , lo cual lleva a suponer que la mayoría de los hogares se benefician del subsidio. En el 2012, que el costo de extracción, transporte y potabilización de un metro cúbico de agua era de \$12.72 y se cobraba a \$7.22 (Nuño, Analý S., 2012). En el 2015 esta tarifa para uso habitacional es de \$11.66, aún por debajo del costo de producción del 2012 (Jalisco, Periódico Oficial del Estado de, 2014). En Tlajomulco, por su parte, se cobra cuota fija anual, independiente del consumo, lo cual no sanciona el desperdicio ni incentiva el ahorro. En ambos casos, en la tarifa no están contemplados los servicios ambientales que la fuente provee (como la Economía Ambiental sugiere, y es una disciplina suscrita a la perspectiva de la Sustentabilidad Débil). Para el caso del agua proveniente de Chapala, por efecto de su extracción el nivel de este es más bajo, lo cual representa afectaciones a la función paisajística, de soporte a la vida acuática, entre otros.

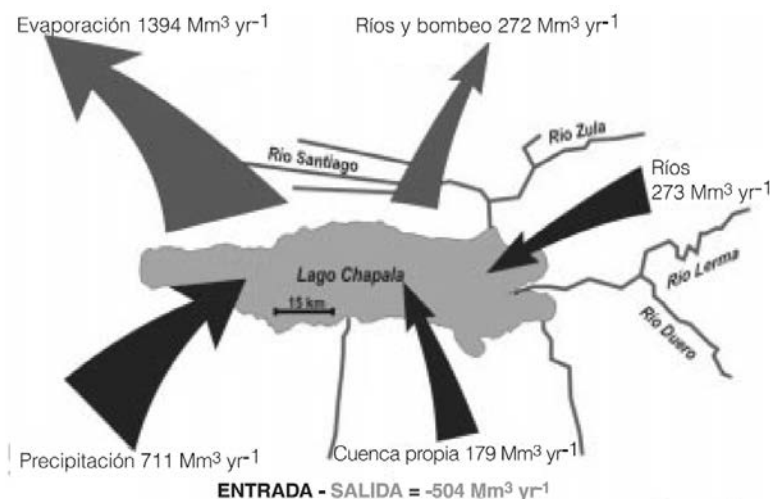
Abastecimiento de Agua	
Situación actual:	
Lago Chapala	$5.5 \text{ m}^3 \times \text{seg.}$
Pozos Profundos	$3.0 \text{ m}^3 \times \text{seg.}$
Presa Calderón	$1.0 \text{ m}^3 \times \text{seg.}$
<b>Total</b>	<b><math>9.5 \text{ m}^3 \times \text{seg.}</math></b>
Demanda Z.C.G.	$13.06 \text{ m}^3 \times \text{seg.}$
<b>DEFICIT <math>-3.56 \text{ m}^3 \times \text{segundo}</math></b>	

**Tabla 2.** Fuentes de abasto de la Zona Conurbada de Guadalajara.  
Fuente: Comisión Estatal del Agua (CEA, 2009)

De acuerdo con el SIAPA, el abasto en el 2014 fue en promedio de  $9.4 \text{ m}^3/\text{s}$ , como se muestra en la tabla anterior (SIAPA, 2014a, 2014b, 2014c, 2015). Las principales fuentes de abastecimiento son: Acueducto Chapala-Guadalajara con capacidad máxima de concesión de  $7.5 \text{ m}^3/\text{s}$  y con capacidad de extracción de  $5.5 \text{ m}^3/\text{s}$  (58% del total). De los pozos profundos establecidos en los acuíferos de Atemajac y Toluquilla se estima una extracción de  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  (31.5%). Del acueducto de la Presa Calderón con capacidad máxima instalada de  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  se toma  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  (10.5% del total) (CEA, 2009).

Aquí se ve que la ciudad no es autosuficiente en términos de agua: la fuente principal de abasto pertenece a otra cuenca (Chapala); el resto que se extrae del subsuelo corre el riesgo de agotarse si su explotación es mayor a su tasa de recarga. En efecto, el agua almacenada en el lago proviene del río Lerma que nace en el Estado de México y atraviesa varios estados antes de desembocar en el lago, de lluvias sobre su superficie, escurrimientos de las laderas que lo contienen (ver figura siguiente).





**Figura 1.** Balance de agua en el lago de Chapala en 1995.  
Fuente: (Hansen, Anne M; Afferden, Manfred van, 2004)

Téngase en cuenta que estas fuentes de abasto sólo corresponden al SIAPA y que tanto Tlajomulco, El Salto y Juanacatlán no reciben este servicio, que de acuerdo al anterior censo, entre ellos sumaban en el 2010, 568,070 habitantes, es decir más de un 10% de demanda adicional. En Tlajomulco el agua se extrae del subsuelo y estos volúmenes no son medidos, por lo que sólo se puede estimar el consumo. Suponiendo una dotación media similar a la de la zona SIAPA, al gasto exigido al SIAPA de 9.4 litros/s se sumarían 1.3 litros/s más, quedando una demanda de 10.7 litros/s. De igual manera, dentro de Zapopan, Tonalá y Tlaquepaque, existen colonias que no son abastecidos por la red del SIAPA y que recurren a pipas y pozos para suplir esta deficiencia. La demanda total de la Zona Conurbada de Guadalajara ha sido estimada en 13.06 m<sup>3</sup>/s (CEA, 2009).

Los acuíferos de la ZMG se están agotando al ritmo que se muestra en la siguiente tabla (CEA, 2009). Se ha cuestionado su confiabilidad pues no parecen existir modelos completos y mediciones suficientes para avalarlos. Lo que no está en duda es la sobreexplotación del agua subterránea.

Acuífero	Volumen en millones de m <sup>3</sup>		
	Recarga	Extracción	Variación anual
Atemajac	139.17	159.63	-20.46
Arenal	14.54	15.422	-0.882
Ameca	256.42	123.766	132.654
San Isidro	64.18	65.237	-1.057
Toluquilla	86	102.505	-16.505
Cajititlán	41.088	41.226	-0.138

**Tabla 3** Extracción vs Recarga anual de los acuíferos de la ZMG.  
Fuente: Elaboración propia con datos de CEA, 2009.

También se sabe que el sistema de distribución de agua potable de la ZMG presenta fugas calculadas en el orden del 30% del agua bombeada (López-Ramírez, Mario Edgar, 2013). Parte del abasto podría solventarse eliminando estas pérdidas.

De acuerdo con el CEA (CEA, 2009), para el 2009 existía un déficit de abasto en la ZMG estimado en 3.56 m<sup>3</sup>/s y cabría esperar que esta cifra hubiera aumentado con el crecimiento de la población. Ante el déficit en el abasto de agua las autoridades adoptan una perspectiva de aumento de oferta o suministro más que buscar reducir el consumo per cápita, minimizar las pérdidas y suplir el abasto con agua de lluvia o tratada. La política tradicional es buscar nuevos acuíferos o cuerpos de agua que explotar o la construcción de obras de infraestructura de alto costo, como es el caso de las presas del Zapotillo y El Purgatorio. También se ha hablado de un segundo acueducto Chapala – Guadalajara (CEA, 2009). Por tanto, se externalizan los costos ambientales a otras regiones. Guadalajara como muchas otras ciudades, está buscando nuevas fuentes de suministro de agua, encontrándolas cada vez más lejos y aumentando su perímetro de afectación cada vez más. Esto llevará inevitablemente a disputas por este recurso con otras poblaciones, ciudades y la industria agrícola.

La construcción de estas presas tiene varias implicaciones. Primero requiere una inversión fuerte de recursos monetarios por parte del gobierno, limitando el gasto corriente o volviéndose una carga para generaciones futuras en forma de deuda pública. Las tierras a inundar algunas veces están habitadas (¿un valle cruzado por un río no es una ubicación interesante para asentarse?), por lo que es necesario desalojar a estas comunidades; con la pérdida del patrimonio cultural edificado, con la reubicación estas comunidades podrían fragmentarse y dispersarse al perder la identidad. Bien parece ser el caso de Temacapulín. ¿Qué pasará con su vida productiva en este nuevo lugar? ¿Podrán seguir teniendo acceso al agua? Quienes son desplazados corren el riesgo de perder mucho.

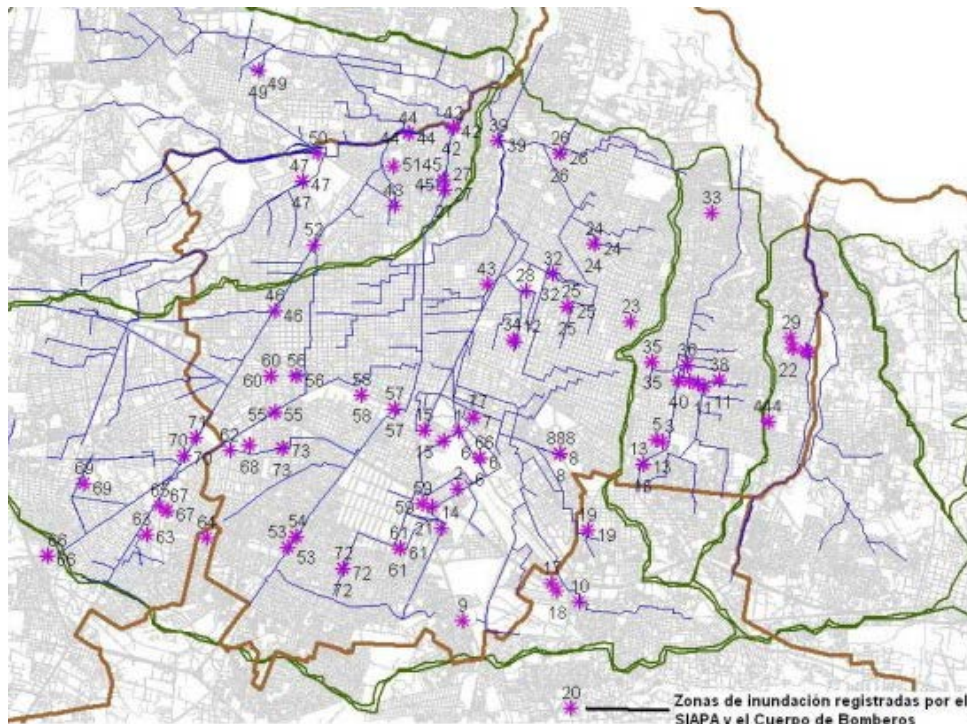
Por otro lado también tiene afectaciones al medio natural. Inicialmente afecta la vida de la flora y fauna de la zona inundada. Después trastocará las dinámicas y ciclos naturales establecidos. Además, una vez hecha la presa, el limitado flujo de agua por el cauce natural alteraría por completo el paisaje río abajo, con un caudal mínimo durante la mayor parte de tiempo y un caudal desbocado cuando se abren las esclusas.

Traer agua de otros lados implica quitársela a alguien más. La disponibilidad del agua se va reduciendo y la competencia por el agua va en aumento. El agua extraída forma parte del ciclo hidrológico de esa región, la cual mantiene el equilibrio de los ecosistemas o abastece a comunidades locales y terrenos de cultivo. Al hacer trasvases, los volúmenes de agua en relación de cuencas se modifican y el territorio es sensible a estos desequilibrios.

El transporte de esta agua es costoso, tanto por su bombeo como por la construcción y mantenimiento del acueducto de cientos de kilómetros de longitud.

El segundo acueducto Chapala-Guadalajara pondría en riesgo el lago mismo. Actualmente extraoficialmente se extraen más de 7.5 m<sup>3</sup>/s de Chapala. Con el nuevo acueducto, se tomarían

más de 10m<sup>3</sup>/s. Suponiendo que actualmente el lago mantiene su nivel (hay evidencias de que existe un déficit), con una mayor tasa de extracción sólo se puede prever la disminución continua del lago hasta su extinción (López-Ramírez, Mario, Ochoa-García, Heliodoro, 2012).



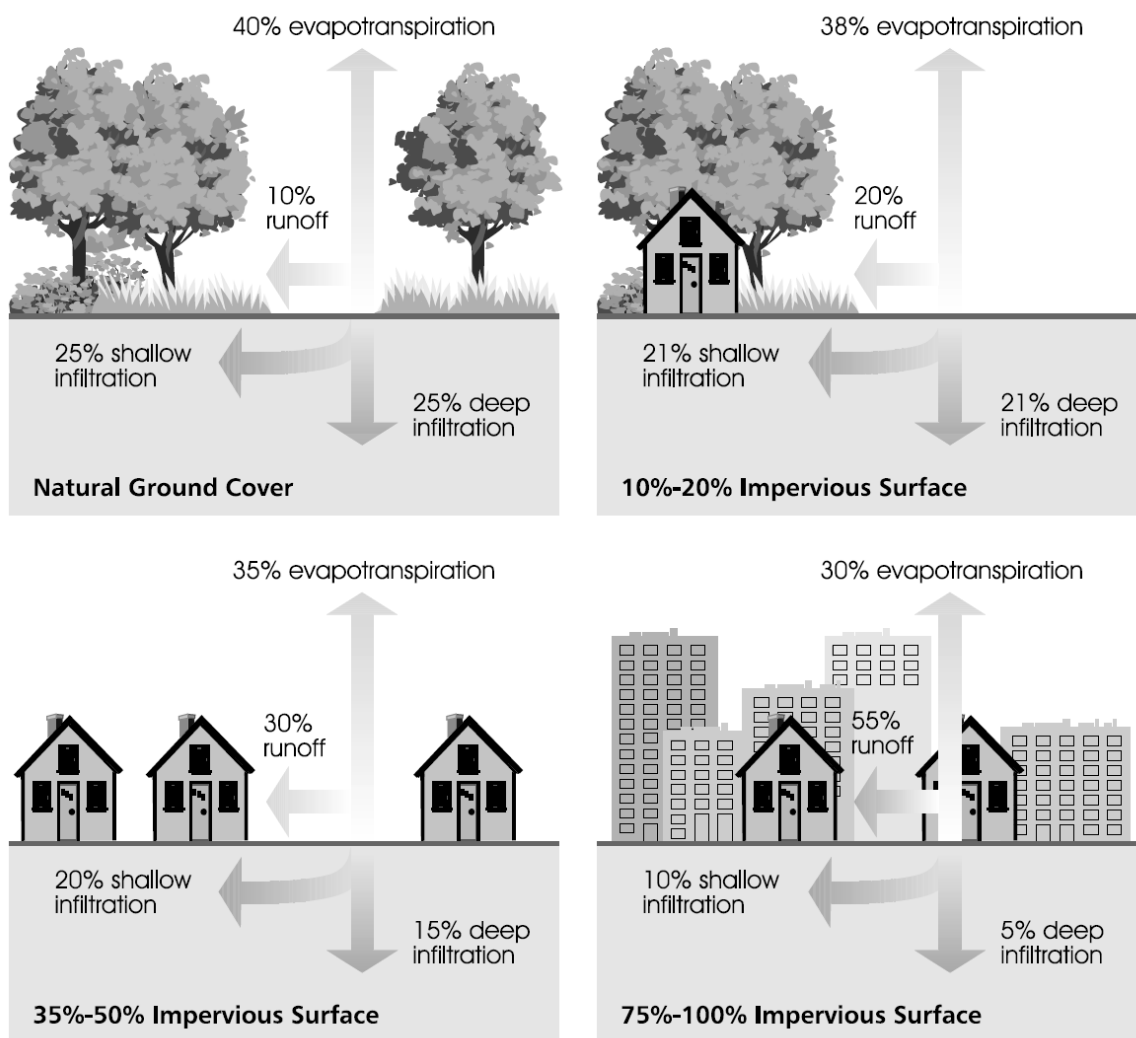
**Figura 2.** Ubicación de puntos de inundación identificados por el SIAPA.

Fuente: (Rueda, Fernando; Centeno, Juan Carlos, 2014)

De forma contradictoria, mientras que la ciudad tiene problemas de abasto de agua potable, año tras año la ciudad se inunda durante el temporal de lluvias. En la figura 2 se ubican los principales puntos de inundación que coinciden con los cauces de los ríos y arroyos entubados en lugar de respetar sus cauces e integrarlos al paisaje urbano.

Otra causa relevante de las inundaciones es atribuible a la sustitución de áreas permeables tales como tierras de cultivo, tierras baldías y zonas forestales que recogían gran parte de los escurrimientos, los retardaban e infiltraban. Con la urbanización de estas tierras, el suelo ahora tiene una cubierta impermeable, por lo que ante una tormenta los caudales de escurrimientos son mayores y se concentran más rápido en los puntos de convergencia.

Como un efecto adicional la tasa de recarga de los acuíferos se ve disminuida sustancialmente. La figura 3 ilustra el efecto de la urbanización en la alteración del funcionamiento hidrológico. Originalmente la mayor parte del agua que cae sobre el territorio se infiltra y se evapora. Conforme las áreas impermeables crecen la infiltración disminuye y esta agua se convierte en escorrentía.



**Figura 3.** Modificaciones al funcionamiento del sistema hidrológico del territorio bajo distintos grados de urbanización.  
Fuente: (Prince George, County of, 1999)

La infraestructura metropolitana es tal, que los colectores de aguas pluviales desembocan sus aguas a la red de aguas negras y sobrecargan tanto la infraestructura de conducción como las plantas de tratamiento de aguas residuales. Para dimensionar el volumen de agua que esto representa, el agua que cae en un año en 937 km<sup>2</sup> (la superficie conjunta de la Cuenca del Ahogado, 520 km<sup>2</sup> y la Cuenca de Atemajac, 417 km<sup>2</sup>) ronda por los 939 millones de m<sup>3</sup> anuales, en contraste con los 410 millones de m<sup>3</sup> anuales (13 m<sup>3</sup>/s) de agua potable demandados por la ZMG para uso doméstico.

La precipitación anual promedio registrada entre 1951 y el 2010 por la estación meteorológica DGE de Guadalajara fue de 1002.4 mm (SMN, 2010). La lluvia de la región se caracteriza por intensas lluvias durante el verano: tan sólo en julio y agosto se suele concentrar la mitad del volumen anual; entre junio y septiembre llueve el 85% del año (SMN, 2010). Este patrón de lluvia



exige la creación de infraestructura para conducir y contener grandes volúmenes de agua y almacenarlos durante los meses de lluvias escasas. El reto técnico consiste en minimizar el volumen de almacenamiento y las pérdidas al mismo tiempo que se maximiza el agua disponible para consumo.

Aparte de desaprovechar este recurso caído del cielo, durante las fuertes tormentas el sistema de drenaje y alcantarillado se ve rebasado, en parte por los objetos arrastrados por la corriente de agua de lluvia y porque el caudal instantáneo supera las capacidades de la red, que ya de por sí es obsoleta en un porcentaje relevante. En el municipio de Guadalajara, la vida útil de 1824 km de un total de 7400 km de tubería (es decir 24.6%) supera los 40 años de servicio. Muchas de ellas presentan fugas cuando trabajan cerca del límite de su capacidad. El agua que se fuga arrastra la tierra generando huecos en el subsuelo y posteriormente hundimientos en las calles (El Informador, 13/08/2013, “Al día, siete socavones en la ciudad”).

Así como el abasto de agua potable tiene sus dificultades ya presentadas, una vez utilizada y transformada su disposición representa otros retos. La ciudad genera un volumen similar de aguas residuales al del agua potable suministrada: Por su uso, el 99.9% de las aguas residuales domésticas es agua, pero al contener sólidos orgánicos en descomposición queda contaminada por completo. La capacidad actual de las plantas de tratamiento en operación es insuficiente, como se explicará a continuación.

Hasta mediados del 2012 sólo estaban en funcionamiento la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Río Blanco, con capacidad de 150 l/s y otras 5 plantas pequeñas en el Salto, Juanacatlán e Ixtlahuacán de los Membrillos que combinadas procesan 117 l/s. Ese mismo año entró en funcionamiento la PTAR del Ahogado, con capacidad de 2250 l/s incrementando la capacidad total instalada del 3% al 23% del total de aguas residuales generadas, lo cual está lejos de ser suficiente. Finalmente, en junio del 2014 se inauguró la PTAR de Agua Prieta, con capacidad de 8500 l/s (alrededor del 80% del volumen actual, si no se incluyen los altos volúmenes durante el temporal de lluvias) (CEA, 2009).

Mientras tanto, un volumen de aguas negras que no logra ser tratado es descargado al río Santiago, que conducirá este material a lo largo de unos 300 km, hasta desembocar en las costas de Nayarit. Esto afecta los medios de subsistencia de las comunidades aledañas que dependían del río Santiago.

Las plantas de tratamiento necesarias para atender de manera adecuada altos volúmenes presentan las siguientes desventajas (Díaz-Cuenca, Elizabeth, Alvarado-Granados, Alejandro, Camacho-Calzada, Karina 2012):

- Requieren una fuerte inversión para su construcción, y un presupuesto considerable para su mantenimiento y operación (el costo de la obra de la PTAR de Agua Prieta se estima alrededor de los \$2,700 millones de pesos).
- Su funcionamiento requiere energía eléctrica para alimentar motores, bombas, bandas transportadoras, controladores, actuadores e instrumentación electrónica.
- De igual forma depende de insumos químicos como hipoclorito de sodio, carbón activado, etc.
- Generan lodos residuales que hay que desalojar y para los que hay que encontrar un sitio de disposición. Estos lodos pueden enriquecer tierras infértiles, pero muchas veces los campos agrícolas están alejados de las plantas de tratamiento haciendo inviable su transporte.
- Muchas no cuentan con mecanismos de captura de metano, que permitiría su aprovechamiento para generar biogás o usar como abono. Por tanto, el metano es liberado a la atmósfera. La PTAR de Agua Prieta ya cuenta con él.

## 1.2 Sistema hidrológico local

### 1.2.1 Cuenca, subcuenca y microcuenca

Antes de entrar en la clasificación hidrológica del territorio conviene introducir los términos de cuenca, subcuenca y microcuenca.

Una cuenca hidrológica es una unidad morfológica territorial delimitada por el parteaguas y que contiene todas las superficies cuyos escurrimientos convergen hacia un cauce y finalmente a un punto común. De acuerdo con esto último se clasifican en exorreicas, endorreicas y arreicas. Las primeras vierten sus aguas al exterior de la cuenca por un punto de salida. Las endorreicas convergen sus aguas a un cuerpo de agua contenido en la cuenca, como un lago. Finalmente, las arreicas infiltran todos los escurrimientos superficiales antes de llegar a un cuerpo colector (INEGI-INE-CONAGUA, 2007).

Una cuenca de primer orden es aquella que conduce todos los escurrimientos hasta su desembocadura en el mar. Esta se puede subdividir en cuencas de orden menor o subcuencas y estas por lo general concluyen en un lago o en la confluencia con otros ríos. Estas se suelen clasificar por su función (cabecera-captación, transporte y emisión) o por su nivel altitudinal (alta, media, baja) (INEGI-INE-CONAGUA, 2007; Moreno Díaz, Alonso; Renner, Isabel, 2007).

Una microcuenca por lo general es parte de una subcuenca aunque no necesariamente. No es su orden sino su superficie lo que la distingue de las otras categorías. En ámbitos rurales o escasamente desarrollados, se suele ligar a una comunidad que hace uso de forma directa de los recursos del área (principalmente suelo, agua, vegetación, fauna). En estos casos, la interrelación de la comunidad con el medio suele ser tal que “ocurren interacciones indivisibles entre los aspectos económicos (relacionados a los bienes y servicios producidos en su área), sociales (relacionados a los patrones de comportamiento de los usuarios directos e indirectos de los recursos de la cuenca) y ambientales (relacionados al comportamiento o reacción de los recursos naturales frente a los dos aspectos anteriores)” (Moreno Díaz, Alonso; Renner, Isabel, 2007).

La dimensión de una microcuenca varía de acuerdo a la escala de análisis y el propósito: si bien suele rondar en la literatura entre 250 y 2000 hectáreas, se identifican unidades denominadas microcuencas de superficies de una extensión notablemente mayor: 4 de 17 microcuencas del municipio de Tlajomulco tienen una extensión entre 5000 y 20000 hectáreas (Tlajomulco de Zúñiga, Ayuntamiento de, 2010b).

## 1.2.2 Clasificación hidrológica oficial del territorio

A nivel nacional el territorio se divide en 37 regiones hidrográficas, que a su vez conforman de cuencas y subcuencas. La Zona Metropolitana de Guadalajara se asienta dentro de la región Lerma-Santiago (RH12), pertenece a la cuenca Santiago-Guadalajara (RH12E).



**Figura 4.** Región Lerma-Santiago y las regiones hidrográficas de México.  
Fuente: Sistema de Consulta de las Cuencas Hidrográficas de México (INECC, 2015).



**Figura 5.** Cuenca Santiago-Guadalajara (RH12E) en relación a la división política municipal del Estado de Jalisco.  
Fuente: Comisión Estatal del Agua en Jalisco (CEA, 2010).



La cuenca Santiago-Guadalajara a su vez se subdivide en 10 subcuencas y la Zona Metropolitana de Guadalajara se encuentra entre dos: Río Corona – Río Verde (RH12Eb) y Río Verde – Presa Santa Rosa (RH12Ec). El último abarca la zona norte de la ciudad y la mayor parte de Zapopan mientras que el primero se extiende hacia el sur, tomando la mayor parte del municipio de Guadalajara, Tlaquepaque y Tonalá completos, así como una proporción importante de Tlajomulco, El Salto y Juanacatlán. La llamada Cuenca del Ahogado, pertenece a esta subcuenca. En la figura 5 se muestran esta división alrededor de la la Zona Metropolitana de Guadalajara en línea marrón, el grosor de línea define la jerarquía del límite (región hidrográfica, cuenca y subcuenca). La división política municipal se representa con líneas de color blanco.

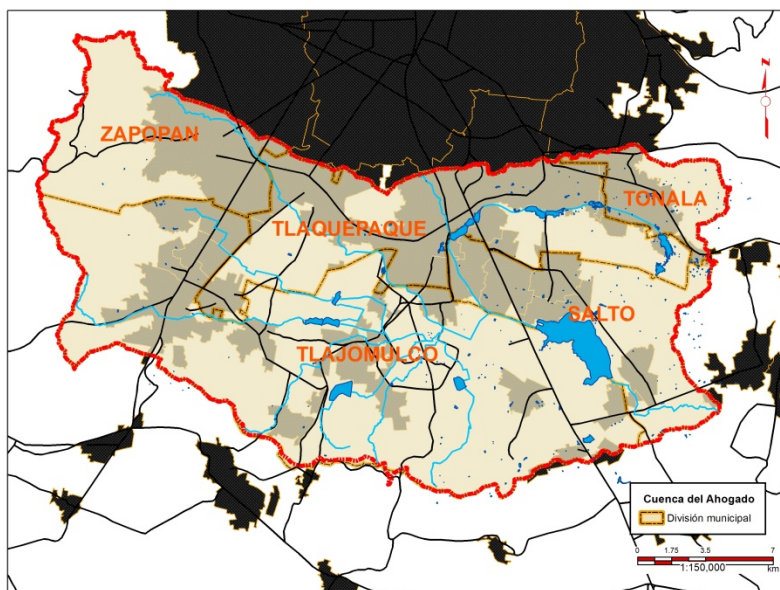


**Figura 6.** División de cuencas y subcuencas hidrográficas alrededor de la Zona Metropolitana de Guadalajara.  
Fuente: SIATL (INEGI, 2015).

La denominación de cuenca y subcuenca en este punto puede resultar al lector confusa y tal como es el caso de la Cuenca del Ahogado, incongruente con el sistema jerárquico planteado inicialmente. Sin embargo considere que el concepto de cuenca y subcuenca son relativos a la escala de análisis. A una escala urbana, tiene sentido hablar de Cuenca del Ahogado.

### 1.2.3 La Cuenca del Ahogado

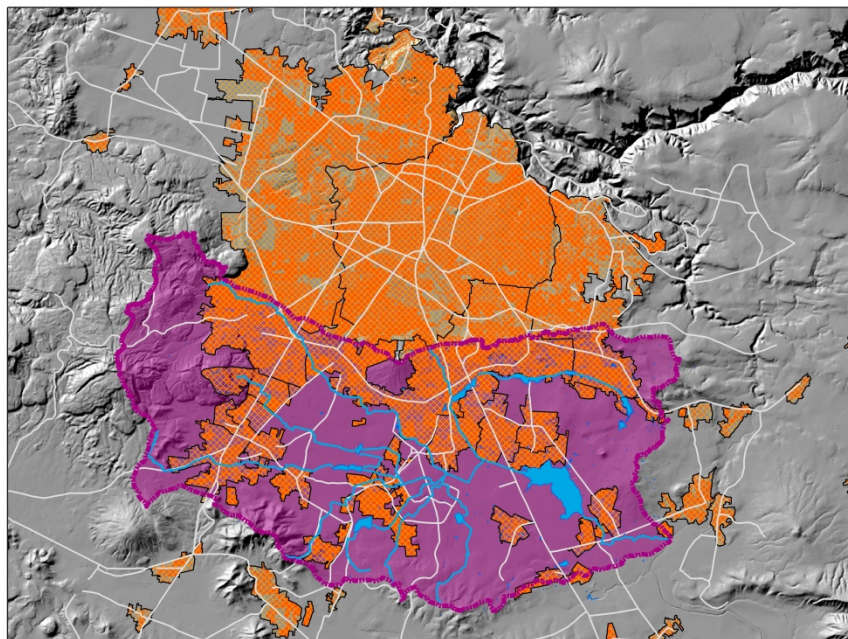
La Cuenca del Ahogado se extiende al sur de Guadalajara, cubriendo 519 km<sup>2</sup>, partiendo del sureste del Bosque de la Primavera hasta el Salto, y de las faldas australes del Cerro del Cuatro hasta el Cerro de las Latillas. Comprende secciones de los municipios de Zapopan, Tlaquepaque, Tonalá, El Salto y Tlajomulco, estando a mitad sur de la cuenca en este municipio (ver imagen siguiente). Obsérvese que la división política en muchos casos no coincide con elementos naturales del territorio. El flujo principal del agua es hacia el oriente, descargando en la presa del Ahogado y finalmente en el río Santiago.



**Figura 7.** La Cuenca del Ahogado y su intersección con los límites municipales.  
Fuente: elaboración propia a partir de bases de datos de INEGI y del ITESO.

La Zona Metropolitana de Guadalajara se extiende sobre la cuenca del Valle de Atemajac principalmente y recientemente la presión de crecimiento ha llevado a un crecimiento acelerado en los últimos años sobre la Cuenca del Ahogado (actualmente con 1 millón de habitantes), siendo recientemente Tlajomulco el municipio de mayor crecimiento a nivel nacional. Pero este crecimiento ha sido disperso, como se puede apreciar en la Figura 7. En la figura la Cuenca del Ahogado (en púrpura) se interseca con la Zona Metropolitana de Guadalajara (en anaranjado). Se observa el relieve (en escala de grises) como condicionante de expansión urbana y como límite de cuenca. Esta expansión ha tenido lugar, sin un plan maestro de desarrollo y no ha sido acompañada con la misma rapidez de la dotación de infraestructura y equipamiento.





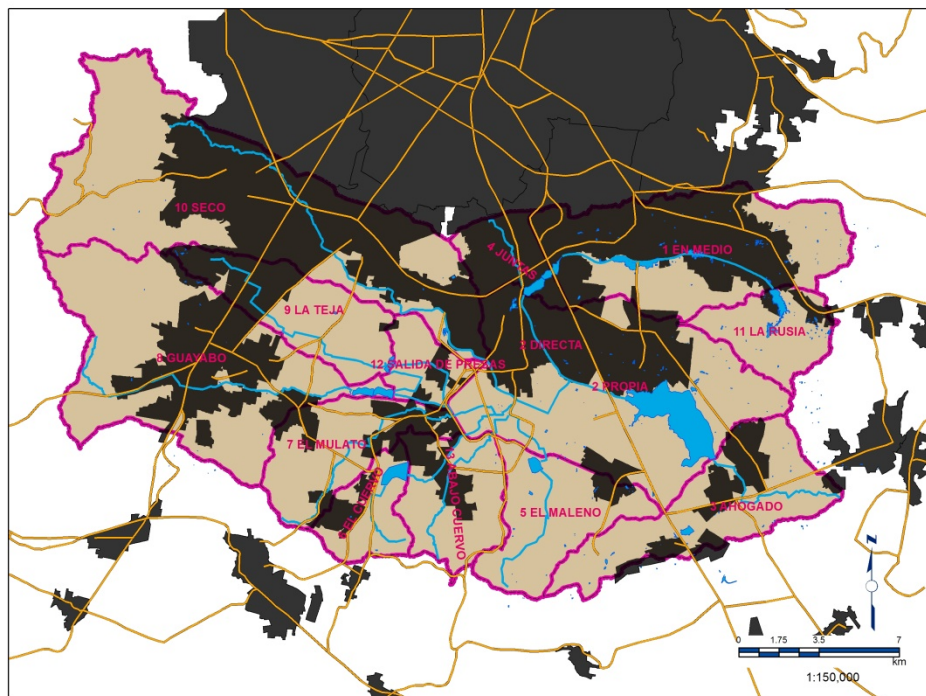
**Figura 8.** La Cuenca del Ahogado y la región del Valle de Atemajac.  
Fuente: elaboración propia a partir de bases de datos de INEGI y del ITESO.

Tal como ya se había mencionado, únicamente los municipios de Guadalajara, Tlaquepaque, Tonalá y Zapopán pertenecen a la red del SIAPA (aunque la cobertura no es completa), mientras que Tlajomulco y El Salto no. En el caso de Tlajomulco, el agua proviene de pozos y su extracción ha sido mayor a su capacidad de recarga por lo que estos empiezan a agotarse. A finales del 2013, la Secretaría de Salud reportó presencia de metales pesados en varios pozos (Plascencia, Ángel 2013), lo cual se puede interpretar como signo de un abatimiento próximo.

La zona central tiene pocos cambios de nivel, por lo que es muy susceptible a inundarse. Estas tierras son fértiles y por mucho tiempo fueron de uso agrícola, pero por estar en un valle resultaron de interés para los promotores de vivienda.

## 1.2.4 La subcuenca del Guayabo

### 1.2.4.1 La subcuenca del Guayabo dentro de la Cuenca del Ahogado



**Figura 9.** División en subcuencas de la Cuenca del Ahogado.

Fuente: bases de datos de INEGI (INEGI, 2010) e ITESO.

La Cuenca del Ahogado a su vez ha sido dividida en 13 subcuencas (ver Figura 8) y el Guayabo es una de estas. En la figura, las áreas grises representan la mancha urbana y las líneas amarillas representan las principales vialidades. Se encuentra al sur poniente del Ahogado, y colinda con otra cuenca hidrográfica, la del Lago de Chapala (RH12D) y específicamente la subcuenca de la laguna de San Marcos (RH12Dc) que pertenece a esta. Si se quiere homologar la subcuenca del Guayabo con la división hidrológica que aparece en el Programa de Ordenamiento Ecológico Local de Tlajomulco (Tlajomulco de Zuñiga, Ayuntamiento de, 2010b), tómense la microcuenca La Culebra – Colorado y la microcuenca Arroyo Seco – San Juanate: El Guayabo es el resultado de la unión de sus superficies.

El punto más alto de la Cuenca del Ahogado está ubicado en el cerro de las Planillas y es compartido por El Guayabo y La Teja. El Guayabo recoge el agua proveniente de la vertiente suroriental del Bosque de la Primavera. La salida de esta subcuenca se encuentra en la cortina de la presa del Molino. Estas aguas pasan a la subcuenca 12 Salida de Presas, después 2 Propia donde se encuentra la Presa del Ahogado y finalmente la subcuenca 3 Ahogado que es la salida de la Cuenca Ahogado al verter sus aguas en el río Santiago.



Según la fuente que se consulte, el Guayabo cubre un área de entre 76.7 km<sup>2</sup> (CEA, 2010) a 80 Km<sup>2</sup> (INEGI, 2015), por tanto representa alrededor de un 15% de la extensión total de la Cuenca del Ahogado y es la tercera más grande en extensión.

El Guayabo se encuentra en la entrada sur de la ciudad y ha tenido un fuerte crecimiento por su vinculación al corredor generado por la carretera a Colima. En cuanto a población, para el 2010 contaba con 97,000 hab., lo que representa el 8.8% de la población total asentada a lo largo de la cuenca del Ahogado.

En cuanto a la división política, la subcuenca está casi por completo dentro del municipio de Tlajomulco, con excepción de la localidad de Santa Anita, que pertenece a Tlaquepaque y dos pequeñas porciones en la cima del Cerro del Tajo que pertenecen a Zapopan (Figura 9).

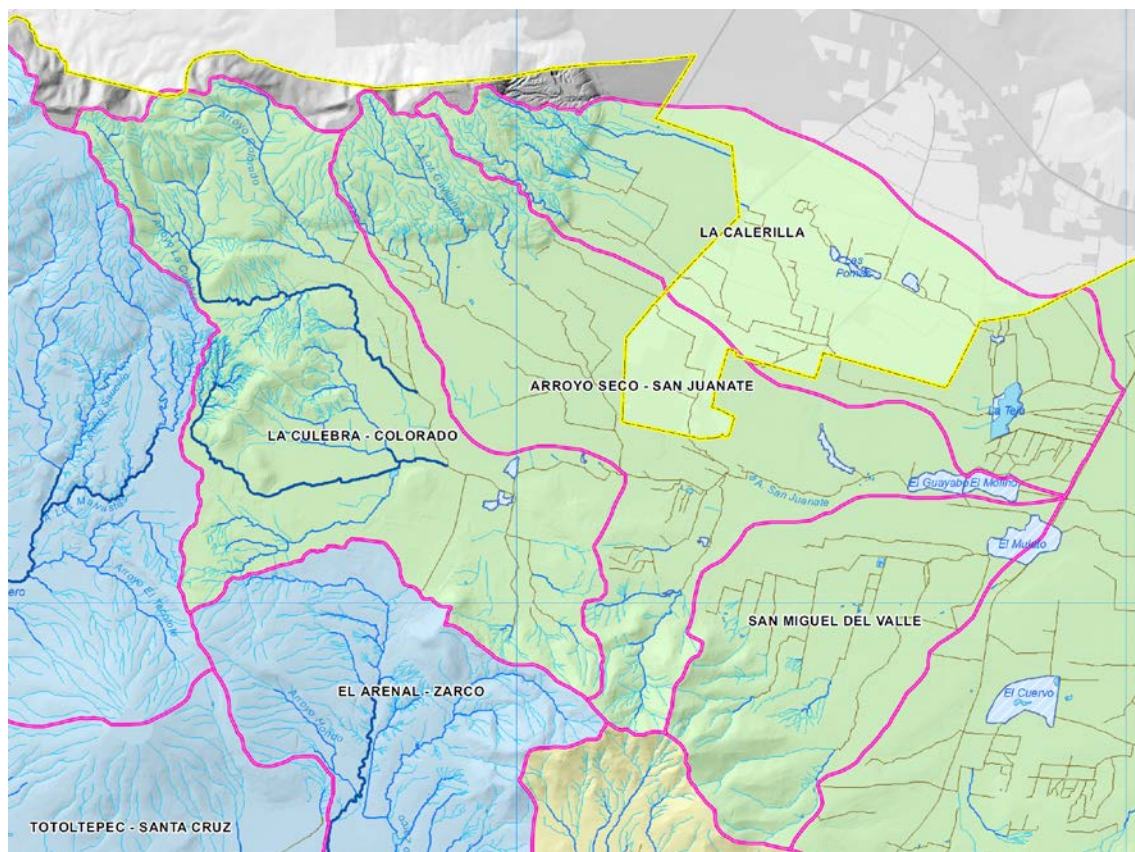


**Figura 10** La subcuenca del Guayabo y límites municipales.

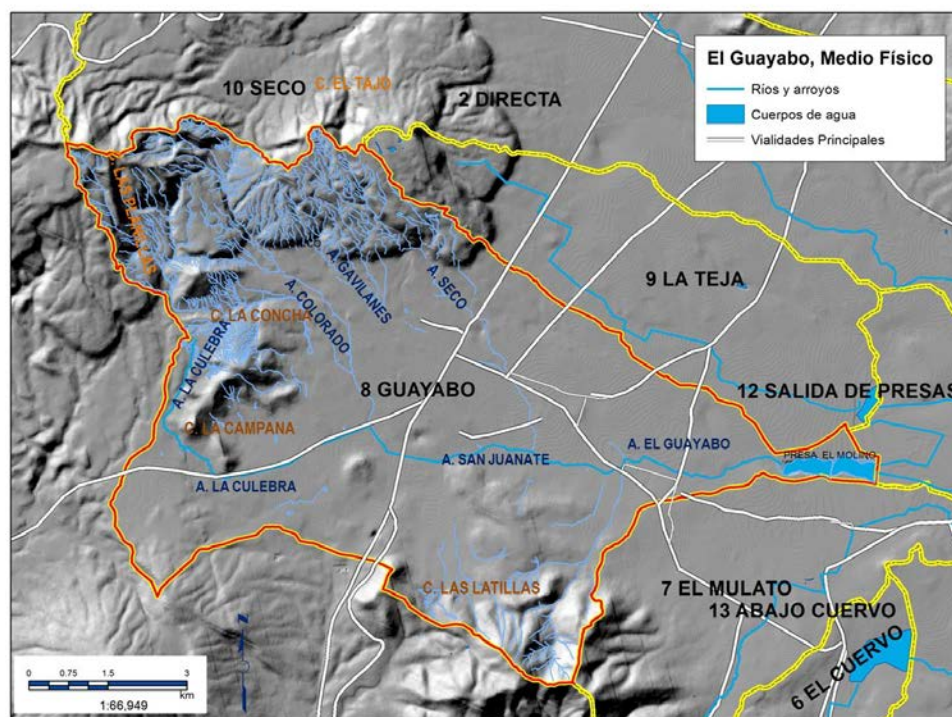
Fuente: elaboración propia a partir de bases de datos de INEGI (INEGI, 2010) e ITESO.

#### 1.2.4.2 División en microcuencas

La subcuenca del Guayabo se subdivide en dos microcuencas, de acuerdo con el POEL de Tlajomulco: La Culebra – Colorado, de 39.58 km<sup>2</sup> de extensión y Arroyo Seco - San Juanate de 35.97 km<sup>2</sup> (ver Figura 25). La primera recoge los escurrimientos de los arroyos que le dan nombre y termina en la confluencia con Arroyo Seco, punto donde el arroyo toma el nombre de San Juanate. La segunda microcuenca toma el cauce del Arroyo Seco y sus afluentes, integra las aguas provenientes de la primera microcuenca y desemboca en la Presa del Guayabo. Mientras que la microcuenca La Culebra – Colorado contiene aún una proporción relevante de áreas no urbanizadas, la microcuenca Arroyo Seco - San Juanate al contar con las partes más bajas de la subcuenca contiene las localidades de Santa Anita, San Agustín y San Sebastián y concentra la mayor parte de la población.



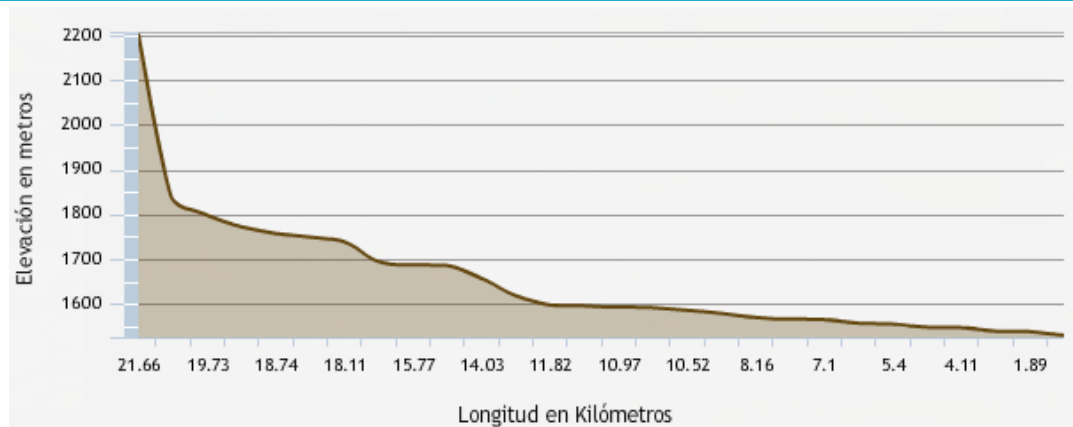
**Figura 11.** Microcuencas de la subcuenca del Guayabo: “La Culebra – Colorado” y “Arroyo Seco – San Juanate”.  
Fuente: (Tlajomulco de Zuñiga, Ayuntamiento de, 2010b).



Fuente: elaboración propia a partir de bases de datos de INEGI (INEGI, 2010) e ITESO.

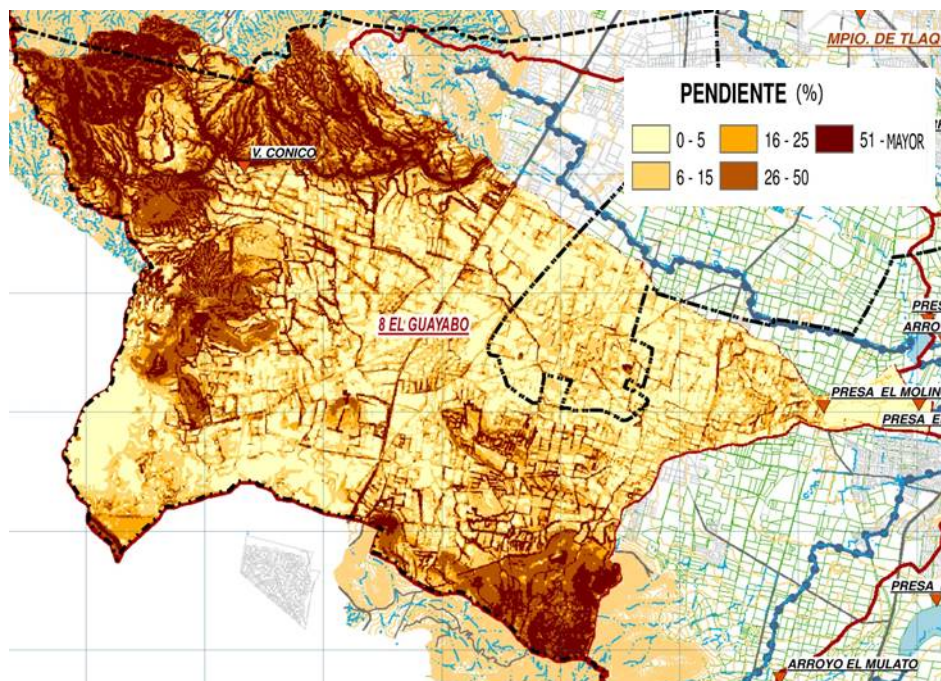
Como se observa en la Figura 10, las principales elevaciones se ubican al norponiente de la subcuenca, correspondientes al Bosque de la Primavera, de donde surgen una gran cantidad de arroyos que alimentan al arroyo del Guayabo. Descienden de la vertiente sur del Cerro del Tajo, de la vertiente sureste del Cerro de las Planillas, y todos los escurrimientos de los cerros de la Campana y la Concha. Otros escurrimientos relevantes tienen origen al sur de la subcuenca, provenientes de la ladera norte del Cerro de las Latillas cuyos escurrimientos son los últimos afluentes en integrarse al curso principal. El flujo dominante es en un principio en dirección sureste y después se vuelve oeste-este por el resto del cauce. La longitud del cauce principal es de 21.66 km, en los que desciende de 2200 msnm hasta 1540 msnm, de los cuales, los primeros 350 m de descenso suceden en el primer kilómetro (ver perfil de elevación en la Figura 11).





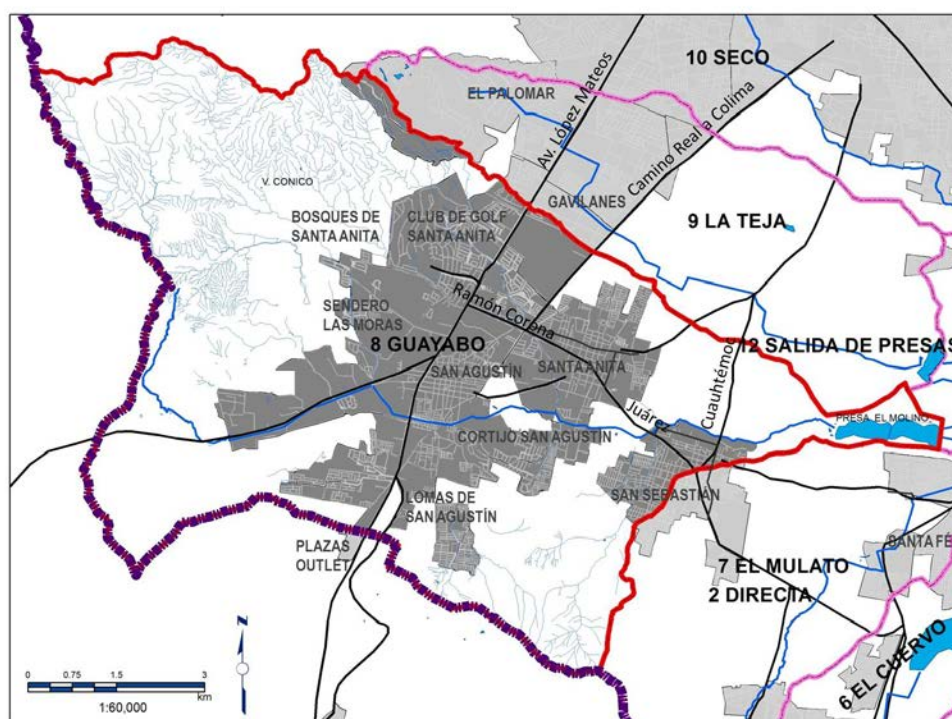
**Figura 13.** Perfil de elevación del cauce principal de la subcuenca El Guayabo.  
Fuente: SIATL(INEGI, 2015).

En el plano de la figura 12 se pueden observar las distintas pendientes que conforman el territorio. Llama la atención la abundancia de puntos con valores superiores al 50% de inclinación que indican que la tipología del perfil de la figura anterior es una situación común alrededor del Bosque de la Primavera. También se observa que el Cerro del Tajo tiene una conformación de terrazas escalonadas. En el centro de la cuenca las pendientes son menores al 15 %.



**Figura 14** Plano de pendientes de la subcuenca El Guayabo.  
Fuente: Comisión Estatal del Agua (CEA, 2010)

#### 1.2.4.4 Descripción socio-demográfica



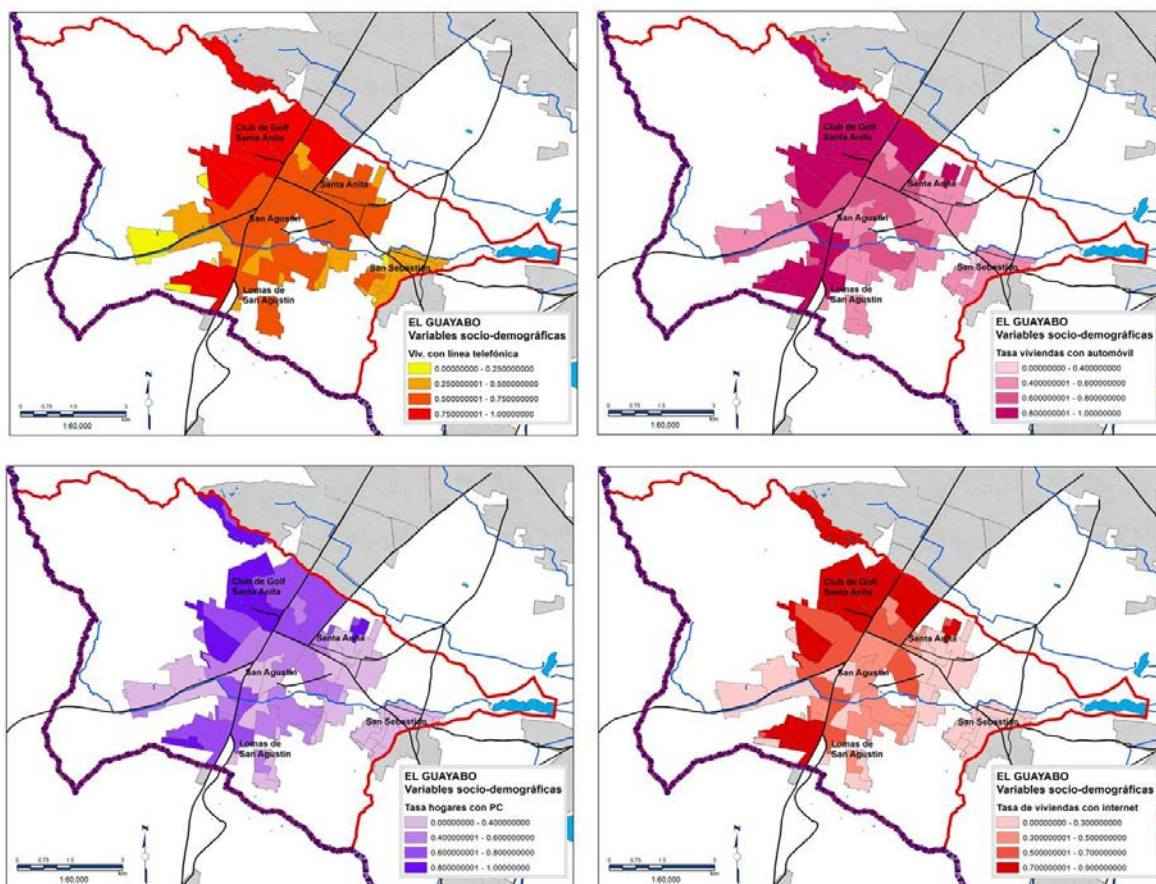
**Figura 15.** Traza urbana, localidades y vialidades principales de la subcuenca del Guayabo.  
Fuente: elaboración propia a partir de bases de datos de INEGI (INEGI, 2010)

De acuerdo al SIATL, que se basa en los resultados del censo del 2010, la población del Guayabo era de 97,185 personas, de las cuales el 60.75% estaban en edad productiva.

El perfil demográfico de la subcuenca se ha ido transformando en los últimos 20 años. Inicialmente, Santa Anita, San Agustín y San Sebastián eran localidades rurales con actividades principalmente agropecuarias. También existían múltiples casas de campo en torno a lo que era anteriormente la Carretera a Morelia. El Club de Golf Santa Anita fue uno de los primeros fraccionamientos exclusivos en la zona, inaugurado en 1969, mucho antes de que el crecimiento se detonara en esta dirección. Fue hasta mediados de los 90's que nuevos desarrollos para clase media y media alta empezaron a madurar alrededor de San Agustín y Santa Anita. En la siguiente década fue cuando la mayor parte de los fraccionamientos alrededor de la antigua carretera, ahora Prolongación Avenida López Mateos, comenzaron a ser desarrollados. En torno al Antiguo Camino Real de Colima después de ser pavimentado se crearon desarrollos para clase media, media baja.

Como resultado, la composición principal por estratos sociodemográficos muestra que el mayor poder adquisitivo se localiza al poniente de López Mateos, mientras que en las localidades de San Agustín, San Sebastián y Santa Anita y desarrollos nuevos de carácter popular el nivel es mucho

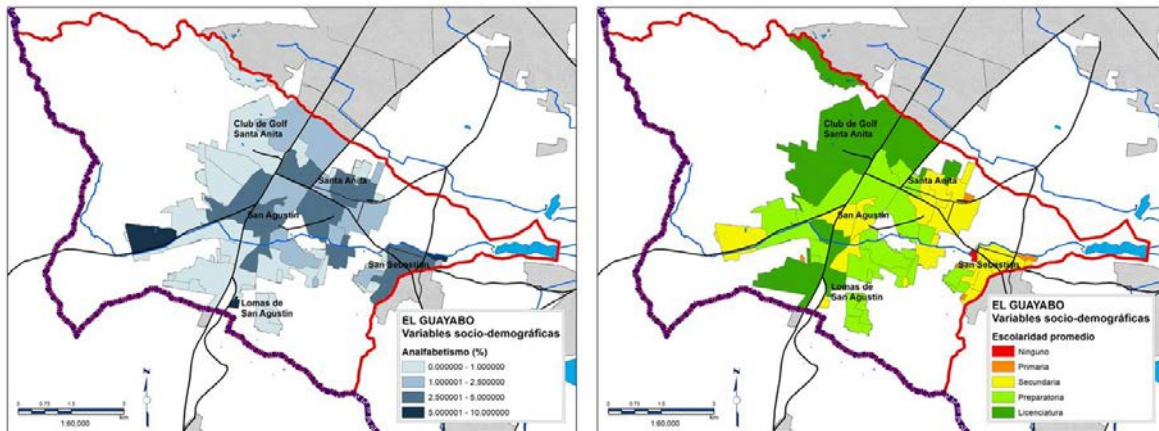
más bajo. Esto se puede constatar a través de variables demográficas, tales como la tenencia de un bien que no es de primera necesidad: teléfono, automóvil, PC, internet propio. En la figura 14 se observan patrones comunes en relación a estos bienes, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: razón de viviendas con línea telefónica; proporción de viviendas con automóvil; tasa de hogares con al menos una computadora y finalmente el índice de viviendas con internet propio.



**Figura 16.** Variables demográficas relativas a bienes y servicios que no son de primera necesidad.  
Fuente: elaboración propia a partir de bases de datos de INEGI (INEGI, 2010).

Esto se termina por corroborar en la figura 15, en la imagen de la izquierda, se muestra la distribución espacial de acuerdo a la tasa de analfabetismo en población mayor a 15 años. En la imagen de la derecha, el grado promedio de escolaridad.





**Figura 17.** Variables demográficas relativas a la educación.  
Fuente: elaboración propia a partir de bases de datos de INEGI (INEGI, 2010).

#### 1.2.4.5 Los retos del Guayabo

Uno de los principales retos es la velocidad del crecimiento urbano ya que implica dotación de infraestructura y equipamiento urbano así como servicios, tales como agua potable, drenaje y alcantarillado. Para dar abasto a la población de agua potable, se ha recurrido a la explotación de agua del subsuelo. A la reducción de la capacidad de recarga se le ha cargado una extracción intensiva por lo que no es de extrañar que muchos pozos estén a punto de abatirse.



**Figura 18.** Identificación de la expansión urbana en la subcuenca del Guayabo por contraste entre la traza urbana registrada en las bases de datos de INEGI con fotografías aéreas más recientes  
Fuente: elaboración propia a partir de bases de datos de INEGI (INEGI, 2010) y fotos aéreas de Google Maps (Google, 2015).

Parte de este crecimiento ha tenido lugar en el borde del Bosque de la Primavera, sustituyendo zonas de bosques y cultivos en superficies impermeables como se muestra en la Figura 16. Dentro del círculo rojo se observa la presencia de vialidades no registradas en la capa superpuesta de traza urbana. En líneas de color azul, se muestran los arroyos que fluyen a través del territorio.

Tal como se mostró en la descripción geo-hidrológica, del Bosque de la Primavera desciende un número considerable de arroyos que conducen agua a alta velocidad por las altas pendientes (200 a 300 metros en menos de 1 km). Al modificarse el coeficiente de escurrimiento de las zonas aledañas por efecto de la urbanización, ante una tormenta los tiempos de concentración se reducen y los caudales pico aumentan, incrementando el potencial destructivo del agua que escurre. Las barreras interpuestas corren el riesgo de ser dañadas o en el mejor de los casos funcionarán de cortinas, provocando inundaciones.

Otro problema no menos importante es el vertido de aguas residuales a los arroyos, lo que contamina las aguas de lluvia y al estar a cielo abierto pone en riesgo la salud de las personas que habitan cerca de estos.

### 1.3 Ordenamiento territorial en la ZMG

Una parte importante del problema es la forma como se va organizando el territorio, gestionando el crecimiento y definiendo los usos y destinos, es decir, el modelo de planeación urbana.

Aparte de los problemas de la ciudad en torno al agua anteriormente referidos, existen muchos otros tales como la movilidad, manejo de residuos sólidos, contaminación del aire, debilidad del tejido urbano, desigualdad, falta de inclusión, etc. (Román Morales, Luis Ignacio; Foust Rodríguez, David; Sandoval, Yubal, 2013). No se puede ignorar que la planeación no ha sido suficiente o adecuada para responder a la complejidad metropolitana.

El modelo de planeación, prácticamente todos los planteamientos teóricos recientes en nuestro país se desprenden del modelo de Planeación Racional Comprehensiva (PL-RC) que sigue una perspectiva ortodoxa en cuanto a que su postura es sistemática y racional (Gutiérrez Chaparro, Juan José; Villar Calvo, Alberto Javier ; Méndez Ramírez, José Juan, 2010).

“[...] en lugar de favorecer la inclusión de renovados criterios técnicos o de servir de base para el desarrollo científico en este campo, la evolución de la PLU [planeación urbana] en nuestro país ha estado dirigida básicamente a engrosar su carácter normativo en detrimento de su carácter sustantivo mientras que el fenómeno urbano avanza y se aleja de las previsiones. No se logra más que la realización de Planes a gran escala que apenas vinculan los fenómenos territoriales con las estructuras económica, política y social siendo además instrumentos con un carácter más político que técnico. Además de su evidente carácter normativo, la práctica planificadora en México ha estado condicionada por un marcado carácter sectorial al estar subordinada a las medidas adoptadas desde las esferas de decisión política vinculadas básicamente con la PL [planeación] económica y social probablemente, por la influencia del estilo de PL de corte desarrollista promovido durante la década de 1960 del siglo pasado en los países Latinoamericanos [...]” (Gutiérrez Chaparro, Juan José; Villar Calvo, Alberto Javier ; Méndez Ramírez, José Juan, 2010).

Bajo esta lógica, la planeación urbana en nuestro país se entiende como un proceso racional compuesto por una serie de etapas sucesivas que no generan mecanismos para su aplicación efectiva reduciéndose a planes estáticos que tienen como instrumentos los planes parciales y la zonificación. Sus características rígidas y restrictivas de la zonificación han dado lugar a un estilo de planeación urbana que ha resultado evidentemente ineficaz y que sin embargo permanece en uso con apenas algunas alteraciones al modelo introducido en los setenta por el arquitecto Carlos Contreras (Gutiérrez Chaparro, Juan José; Villar Calvo, Alberto Javier ; Méndez Ramírez, José Juan, 2010).

Lo anterior explica que la planeación urbana en la ZMG se caracterice por ser reactiva a la iniciativa privada, con una visión local cuando se requiere una visión general clara y consensuada de metrópoli que sea respetada en la práctica.

La planeación se ha limitado a establecer usos de suelo y densidades de edificación que se modifican a instancias de particulares sin considerar las capacidades para suministrar servicios y equipamiento, la disponibilidad de recursos o la mitigación de riesgos a la población (Román Morales, Luis Ignacio; Foust Rodríguez, David; Sandoval, Yubal, 2013). Los reglamentos operan más como manuales de imagen urbana y buena práctica constructiva.

Con lo anteriormente expuesto se explica que no exista una perspectiva de gestión integral del recurso hídrico ni consideraciones en relación al funcionamiento hidrológico del territorio que pudieran ayudar a manejar las escorrentías y a administrar de forma sustentable los recursos hídricos disponibles en el territorio. Mientras esto sea así, los problemas de inundaciones y de insuficiencia de abasto con fuentes locales seguirán replicándose.

## 2. Justificación

En la subcuenca del Guayabo al igual que el resto del municipio de Tlajomulco el abasto hídrico depende del agua subterránea y estos acuíferos están a punto de agotarse. Por tal razón es pertinente buscar fuentes alternativas locales de carácter renovable como es el agua de lluvia.

Por otro lado, con la creciente urbanización de la superficie de la subcuenca la escorrentía aumenta de forma significativa lo que deriva en inundaciones y daños patrimoniales.

Por lo anterior, este trabajo busca aportar una perspectiva distinta para la construcción de ciudad, tomando como eje al metabolismo del agua y buscando crear relaciones perdurables con el entorno de la misma manera que esto sucede en los sistemas vivos. Para este efecto se considera crucial integrar la gestión del recurso hídrico en la planeación urbana, de forma que se conserve el funcionamiento hidrológico previo al desarrollo urbano y se protejan las áreas del territorio que realizan servicios ambientales fundamentales como es la provisión de agua dulce.

Resulta clave influir a los principales actores de la construcción para la inclusión de tecnologías alternativas que permitan aprovechar el agua de lluvia y las aguas grises, así como en la medida de lo posible tratar las aguas de desecho. De esta forma, el problema ser resuelto de forma distribuida, lo que lo hace manejable y económico.

Por otro lado, el ITESO en sus orientaciones fundamentales manifiesta su compromiso social más allá de cualquier especulación académica, en la participación de la acción transformadora del mundo desde una postura de apertura respetuosa y crítica. Además por su inspiración de tradición educativa jesuita se compromete con la búsqueda de la verdad mediante el análisis constante de la realidad. Al estar el campus ubicado dentro de la Cuenca del Ahogado, compele de forma directa a la Universidad a involucrarse activamente en la construcción de las condiciones más adecuadas.

El futuro del agua en nuestro país representa una gran preocupación para el investigador. Por otro lado, el mismo ha sido testigo de la degradación de la calidad de vida de la ciudad causado por un crecimiento explosivo desordenado mientras el crecimiento económico ha sido menor y mal distribuido. La motivación primordial del investigador es legar a sus hijos una ciudad con una calidad de vida al menos igual a la que el que le ha tocado la fortuna de vivir.

### 3. Objetivos

Con respecto a la planeación urbana como objeto de estudio conceptual:

1. Presentar indicadores, metodologías, herramientas de análisis, criterios de diseño y estrategias de acción que puedan servir de base para un modelo alternativo de planeación urbana que considere los recursos hídricos del territorio y los fenómenos hidrológicos que suceden en él, así como responsable en su consumo, utilización y disposición.
  - 1.1 Proponer y justificar una lógica distinta de organización y administración del territorio desde una perspectiva hidrológica.
  - 1.2 Desarrollar herramientas, métodos, criterios e indicadores que puedan ser empleados para definir usos y aptitudes de suelo, así como áreas restringidas (zonas de recarga y descarga de acuíferos, cuerpos de agua) y zonas de riesgo, con base en el relieve, el tipo de suelo, hidrología y sistemas naturales.
  - 1.3 Definir criterios, estrategias y acciones que se deben considerar en la planeación para el aprovechamiento del agua pluvial como fuente de abasto de agua potable.
  - 1.4 Presentar estrategias y acciones de bajo impacto que ya han sido utilizadas con éxito que no alteran cauces naturales sino que mediante mecanismos integrados con el paisaje logran conservar los volúmenes naturales de escurrentía y los coeficientes de escurrimiento del terreno.
  - 1.5 Integrar en las estrategias de planeación el manejo de las aguas residuales de forma que esto pudiera ser de bajo impacto.

Con respecto al objeto de estudio empírico, la microcuenca del Guayabo:

2. Diseñar estrategias que se traduzcan en mejorar las condiciones hidrológicas y sociales de la microcuenca del Guayabo
  - 2.1 Entender el funcionamiento de la microcuenca, no sólo en cuanto a sus escurrimientos superficiales, sino en su papel como parte de una cuenca mayor y en su relación con acuíferos dentro y fuera de sus límites.
  - 2.2 Analizar el territorio para identificar zonas de riesgo dentro de la microcuenca con el fin de prevenir inundaciones y afectaciones a la población por desbordes y arrastres del agua de lluvia.
  - 2.3 Generar un plan de recuperación del funcionamiento natural de la microcuenca ante problemas causados por la urbanización desordenada e intensa de los últimos años.
  - 2.4 Proponer acciones que ayuden a encontrar una alternativa segura de abasto de agua para la población local que no agote los recursos limitados del subsuelo ni demande la desviación de agua de otras regiones.



## 4. Hipótesis de la investigación

Recapitulando, la pregunta central de investigación es la siguiente:

“¿Qué estrategias se deben seguir en el desarrollo urbano de la subcuenca del Guayabo, de forma que el agua de lluvia pase a ser un recurso estratégico en lugar de ser fuente de problemas y riesgos a la población?”

Como respuesta tentativa a la pregunta de investigación se ofrece la siguiente hipótesis como médula central del trabajo de investigación:

*“Una planeación urbana basada en el manejo integral del agua superficial y acciones estratégicas puntuales permitirían evitar riesgos por inundaciones, y preservar la calidad del agua de lluvia para su infiltración y aprovechamiento para fines de consumo humano en la subcuenca del Guayabo”*

## 5. Marco teórico

### 5.1 Postura epistemológica

Esta investigación parte de la postura de que la realidad puede ser transformada y tiene la pretensión de ser un factor de cambio en dirección hacia la sustentabilidad. La perspectiva con la que se aborda es desde un enfoque positivista.

De igual forma se considera que la realidad es compleja y se aproxima a ella a través de la teoría de sistemas.

Por otro lado se considera que la cantidad y calidad del agua son indicadores de la salud de los ecosistemas. El agua es una parte fundamental de las dinámicas que se suceden en el territorio y no tiene sentido estudiarlos de forma aislada.

Las doxas más comunes son: “el agua casi no cuesta”, “si pago, la puedo tirar”, “el agua nunca se va a acabar”, “la lluvia es un problema”, “los cauces secos están desaprovechados, hay que construir ahí”, “el agua tratada no es suficientemente limpia para volver a ser usada”, “necesitamos aljibe y tinaco”, “los sanitarios tienen que funcionar a base de agua”, “hay que hacer sacrificios para cuidar el agua / vivir de forma más sustentable”, “las soluciones a encontrar se pueden generalizar para la ZMG”.

Para que los resultados de esta investigación puedan ser aceptados como científicamente válidos estos deberán haber sido obtenidos “mediante procedimientos metódicos, con pretensión de validez, utilizando la reflexión sistemática, los razonamientos lógicos, y respondiendo a una búsqueda intencionada. Para esta búsqueda, se delimita el problema que se estudia, se diseña la investigación, se prevén medios e instrumentos de indagación, y se procede a un análisis e interpretación de todo lo estudiado” (Ander-Egg, Ezequiel, 2004). La forma concreta se precisará una vez definida la metodología a seguir.

### 5.2 Perspectiva teórica

La perspectiva adoptada en la presente investigación es a partir de la sustentabilidad. Esta visión tiene un carácter multidisciplinar donde al menos los siguientes factores se toman en cuenta: ambiental, social, económico, cultural y político, como fuerzas en tensión por los recursos y el espacio. Esta investigación también se adscribe al enfoque sistémico y la teoría de la complejidad. En gran medida la crisis que vivimos como humanidad se debe a que consideramos nuestra sociedad como algo ajeno a la naturaleza y el mundo que habitamos. La realidad es que formamos parte del sistema y que muchos de nuestros problemas se derivan de vivir en constante conflicto con la naturaleza en vez de integrar nuestras actividades al sistema.

De inicio se buscará elaborar el contexto de la subcuenca desde los distintos factores anteriormente mencionados. El resto del trabajo seguirá una perspectiva más bien de Ingeniería y

Urbanismo sin perder de vista los otros factores. Sin embargo, se debe hacer notar que para que este ejercicio resulte completo se requiere del esfuerzo conjunto de un equipo de profesionistas de diversas disciplinas. Se buscará que la investigación forme parte de una investigación multidisciplinaria, pero en su defecto, se apoyará en las investigaciones que sean vigentes y pertinentes al trabajo.

Dentro de la sustentabilidad existen múltiples perspectivas, escuelas de pensamiento o corrientes. De acuerdo con Dryzek, las distintas posturas se pueden mapear en un plano al emplear dos variables de evaluación: el distanciamiento con respecto del discurso del industrialismo (radical y moderado) y por su capacidad para concebir un sistema de organización socio-económica y política distinta (en prosaicos e imaginativos). De estas combinaciones aparecen cuatro categorías: supervivientes (prosaicos radicales) como el Club de Roma, a favor de detener el crecimiento mediante controles administrativos estrictos; los solucionadores de problemas (prosaicos moderados) que resuelven los problemas inmediatos pero no indagan los problemas de fondo; el desarrollo sustentable (imaginativos moderados) inspirado en el Informe Brundtland y con cabida para la Economía Ambiental y la Economía Ecológica, los movimientos conservacionistas mediante Parques Naturales y Reservas; y por último el radicalismo verde (imaginativos radicales) que proponen refundar la sociedad, habiendo un sinnúmero de visiones para llevar esto a cabo (Dryzek, John S., 1997).

Otra categorización relevante por su frecuencia de aparición en la literatura consultada habla de Sustentabilidad Débil (o blanda) y Sustentabilidad Fuerte (dura o profunda). Este es uno de los puntos medulares de debate entre la Economía Ambiental y la Economía Ecológica (*Ilge, Lydia, Schwarze, Reimund, 2006*).

En el Informe Brundtland y en general la visión de la economía neoclásica (y la Economía Ambiental por extensión) consideran que el capital natural puede ser sustituido por capital humano sin riesgo de agotar los recursos: mediante la tecnología e inversión este capital humano podrá ser convertido de nuevo en capital natural de ser necesario. El crecimiento permitirá el desarrollo de la tecnología y recursos monetarios para hacerlo posible (Leal, Gabriel Enrique, 2004?).

La Sustentabilidad Dura rechaza esta posibilidad tajantemente. Desde esta perspectiva, el sistema económico depende del ecosistema y por lo tanto no pudiera existir sin él, o dicho en los términos usados anteriormente, el capital humano y el capital natural son complementarios y sólo pueden ser sustituidos de forma limitada. La naturaleza al estar contenida en un espacio delimitado no podría soportar el crecimiento ilimitado de la población y de las actividades económicas (Leal, Gabriel Enrique, 2004?).

Se podría argumentar que las estrategias que pudieran ser propuestas como resultado de este trabajo caen en el dominio de la Sustentabilidad Débil o en el espectro de los “solucionadores de problemas”. Y en cierta forma hay rasgos que comparte con estas posiciones: es una respuesta práctica a un problema existente como son el agotamiento y la contaminación de las fuentes de

agua sin modificar radicalmente nuestro estilo de vida. Podría parecer que el problema quedaría resuelto. Y ¿es así?

Esta postura, sin embargo se justifica por lo siguiente: En primer lugar, un cambio radical de las estructuras sociales, políticas y económicas se va gestando poco a poco y es un proceso complejo, detonado por un sinnúmero de factores, mientras que el problema del agua exige acciones inmediatas que reduzcan el desperdicio y la tasa de agotamiento de las fuentes de suministro. ´

En segundo lugar, la preocupación por un metabolismo del agua equilibrado está ligada con una comprensión de que el capital natural es insustituible y obedece a los principios básicos de manejo de recursos renovables y no renovables del desarrollo sustentable dentro del marco de la Economía Ecológica y Sustentabilidad Dura (Daly, Herman E., 1990).

A decir del manejo que se le ha dado al agua dulce en nuestra civilización, pareciera que el agua nunca se va a acabar. Pero la realidad es distinta, el consumo que hacemos del agua dulce no permite que esta se recupere en su totalidad. Una porción de esta agua dulce es contaminada o desemboca en el mar a una tasa mayor a la que la naturaleza puede limpiarla o desalinizarla y condensarla sobre los continentes.

El ciclo del agua puede entenderse como una combinación entre un fenómeno “macro” y uno “micro”. En el ciclo “macro” el agua de los océanos se evapora y una parte de ella se precipita sobre las tierras continentales donde se infiltra, se absorbe por la vegetación y escurre hacia los ríos que la conducen de vuelta al mar. El ciclo “micro” sucede de forma local: el agua que llueve sobre una región se genera por la evaporación y transpiración local y esta agua vuelve a caer sobre este territorio. Generalmente se desprecia la magnitud del ciclo “micro” del agua, sin embargo, 410 de 710 mm en promedio que caen sobre los continentes se evaporaron de estos (Kravcik, M; Pokorny, J; Kohutiar, J; Kovac, M; Toth, E, 2007).

De acuerdo a esta información, si se desea tener un régimen de precipitación estable y por tanto contar con el agua de lluvia como un recurso renovable, se debe actuar de forma que el ciclo “micro” no se vea afectado. Para ello se debe garantizar la evaporación local y mantener los volúmenes de escorrentía originales al territorio previo al desarrollo evitando de esta forma que esta agua escape al mar. La cubierta vegetal cumple con esa función: reduce la escorrentía y devuelve a la atmósfera parte del agua en el subsuelo de forma controlada mediante la evapotranspiración cerrando el círculo virtuoso. En cambio, cuando la mayor parte del agua que cae en un lugar no logra ser retenida y escurre, el volumen de agua que se evapora y transpira es menor lo que va deteriorando el ciclo local o micro del agua (Kravcik, M; Pokorny, J; Kohutiar, J; Kovac, M; Toth, E, 2007).

En cuanto al agua como capital natural, esto es así dado que el origen del agua es previo a la humanidad y el ciclo de regeneración es llevado a cabo por mecanismos naturales. Es indispensable en los procesos biológicos, pero también en los procesos de transformación, por ejemplo la erosión y la sedimentación y de regulación de la temperatura. Los sistemas biológicos hacen uso de ella pero establecen mecanismos para su regeneración antes de devolverla, lo que

asegura la preservación del sistema mismo. Un manejo sustentable del agua debiera de seguir un principio similar.

### 5.3 El metabolismo del agua en la planeación urbana

El metabolismo urbano es un concepto utilizado en urbanismo de forma reciente y está relacionado con la sustentabilidad urbana, en el que la ciudad es un sistema abierto que depende de insumos externos para su funcionamiento y genera residuos. Por tanto el metabolismo urbano es el conjunto de procesos de intercambio de energía, materia e información de una ciudad o población con su entorno y de forma más general con la biósfera (Rueda, Salvador, 1997).

El metabolismo urbano pretende analizar la relación con el ambiente a través de indicadores sobre procesos internos, los insumos demandados, los productos y los desechos, con el fin de modificarlos para afectar menos a la biósfera y asegurar la supervivencia de la misma ciudad. Aspira a gestar un nuevo urbanismo, que establezca relaciones sanas y duraderas con el entorno.

En relación con el metabolismo del agua, el objetivo que se persigue es que el desarrollo urbano tome en cuenta el ciclo hidrológico local para no agotar los acuíferos. Sus líneas de acción van en relación a optimizar el consumo y aprovechar aguas pluviales y residuales para sustituir parte de la demanda (Barcelona, Agencia d'Ecología Urbana de, 2007). Las distintas células que componen esta ciudad (viviendas, comercios, edificios públicos, industrias) juegan un papel crítico en la consecución de estas metas.

#### Definición del Metabolismo del Agua

De acuerdo a su definición nominal se entiende por metabolismo al conjunto de reacciones y transformaciones químicas y biológicas que se efectúan en los organismos vivos y sus células en su proceso de nutrición. La palabra metabolismo proviene del griego μετα, más allá y βολος, golpe o tiro. En un organismo vivo o una célula, el metabolismo es el conjunto de procesos bioquímicos y biofísicos que ocurren al interior. Este ser toma nutrientes y energía del exterior, los transforma para poderlos asimilar para crecer y/o sobrevivir. Al final de estos procesos, el sistema elimina lo que no necesita.

Ya Marx hablaba de metabolismo para definir los procesos entre la sociedad humana y la naturaleza con el fin de explicar las acciones de regulación y control entre humanos y el mundo natural. En este contexto, el ser humano debe modificar al mundo natural mediante el trabajo para lograr la supervivencia. Aunque las necesidades son inevitables, el valor de uso del mundo material es construido de forma social e histórica y por tanto interpretado culturalmente (Zanuccoli, Mariel, Moscoloni, Nora, Portapila, Margarita, 2010).

Marx también hacía mención al concepto de ruptura metabólica para describir el fenómeno en el que se da una interrupción del ciclo de intercambio orgánico (como podría ser la disminución de fertilidad del suelo que Marx observó). Para él, este fenómeno tendría su causa en las prácticas de

los hombres, las formas sociales de explotación y la organización social del territorio. Ya en autores recientes, este socio-metabolismo de Marx se complementa con análisis de flujos de materia y energía. La actividad humana y el intercambio con el medio natural y su modificación, tales como la explotación de recursos naturales, la organización productiva y la alteración del territorio. Desde esta visión se consideran múltiples dimensiones que influyen en la relación de una sociedad con su medio natural: económica, cultural, político-administrativa, etc., de este modo cada sociedad tiene un metabolismo único (Zanuccoli, Mariel, Moscoloni, Nora, Portapila, Margarita, 2010).

El metabolismo urbano del agua es como la nutrición celular. La célula necesita nutrientes que se encuentran disueltos a su alrededor. La membrana celular entonces permite entrar aquellas sustancias que la célula necesita. Los nutrientes absorbidos son utilizados en los distintos procesos que se suceden al interior de la misma. En estos, los nutrientes podrían sufrir transformaciones químicas. De estas reacciones quedan residuos que la célula secreta por su membrana hacia el exterior. Esto funciona porque las células pertenecen a un sistema que cuenta con mecanismos auto-regulados que proveen estos nutrientes y otros que aprovechan los residuos o encuentran la forma de disponerlos de una forma que no ponga en riesgo su integridad. De igual forma, nosotros debemos adaptar el metabolismo urbano del agua para no agotar las fuentes de agua potable y devolver los residuos de forma que no se rompa el equilibrio. Se busca la autosuficiencia energética e hídrica de las viviendas y el manejo responsable y eficiente de residuos.

Por tanto, el metabolismo del agua se trata de un proceso de transformación y aprovechamiento, distinguiéndose del metabolismo biológico del agua. En este caso, el aprovechamiento y uso del agua es para poder efectuar distintas tareas al interior de una edificación. Ya sea para limpieza y lavado, preparación de alimentos, riego, eliminación de desechos, como solvente, para enfriar, etc.

El metabolismo del agua se compone en varias etapas: captación, distribución, almacenamiento, consumo – transformación y eliminación. Estas etapas en un funcionamiento tradicional aparecen de forma secuencial. Los esquemas alternativos consideran la reutilización y tratamiento de aguas por lo que aparecen bucles en el proceso.



## 6. Estado del Arte

### 6.1 Gestión del agua

Ante la gestión del agua discrecional, centralizada, mediática, en favor de intereses particulares, inefectiva, sin rendición de cuentas ni transparencia e insustentable, existen alternativas al modelo existente. Los siguientes modelos de gestión tienen en común una apuesta por la inclusión de todas las partes interesadas y la búsqueda de la protección ambiental generando beneficios sociales y económicos.

#### 6.1.1 Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH)

Definido por la misma Global Water Partnership, “la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es un proceso que promueve el desarrollo y manejo coordinados del agua, la tierra y otros recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales” (GWP, Global Water Partnership, 2011).

La GIRH es un estilo de gestión multidimensional y participativa, en contraste con los métodos tradicionales de gestión. Contempla a los recursos hídricos de forma integral, tanto en su calidad de recurso natural indispensable con trascendencia social y económica, como en su papel en los ecosistemas. Por tanto pretende tomar en cuenta los distintos usos que entran en competencia con el fin último de posibilitar que las personas puedan tener acceso a estos recursos de forma sostenible y equitativa (GWP, Global Water Partnership, 2011).

Este enfoque implica por tanto:

- Considerar los diferentes usos y necesidades en torno al agua
- Involucrar a todas las partes interesadas, de forma que puedan influir en el proceso de planificación y gestión.
- Las decisiones a nivel local y de gestión de cuenca deberán alinearse con el interés regional y nacional
- Las estrategias y planes deberán incorporar objetivos económicos, sociales y ambientales

(GWP, Global Water Partnership, 2011)

#### 6.1.2 Propuesta de Arturo Gleason hacia una gestión sustentable del agua en la ZMG

Gleason propone para Guadalajara un modelo de gestión urbana sustentable del agua (GUSA) basado en el concepto de sustentabilidad y diagnóstico. Para ello se apoya en el modelo de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) de Global Water Partnership.

La contribución de Gleason es considerar al agua pluvial y las aguas residuales como parte del recurso hídrico disponible. Al considerar las aguas residuales se aborda el agua en su metabolismo urbano completo. La GIRH busca garantizar un acceso equitativo al agua, la GUSA pretende además que los usuarios hagan uso del agua de forma responsable y eficiente dentro de los límites

de carga del ecosistema. Finalmente, considera que la gestión participativa depende de la gestación de una conciencia en los ciudadanos sobre los problemas y las alternativas de solución de modo que esto permee hacia las instituciones y organismos a los que pertenece y finalmente resulte en un cambio cultural, reforzado con normas y acuerdos (Gleason-Espíndola, José Arturo, 2012).

Para efectos de este trabajo, al referirse a la gestión integral del agua (o recurso hídrico) se alude a la variante de Gleason por haber sido concebida específicamente para la ZMG, por su perspectiva de metabolismo completo del agua y por compeler a los distintos actores a un consumo responsable.

#### 6.1.3 Un nuevo enfoque de gestión de cuencas hidrográficas

Se trata de un modelo de gestión participativo e integrado del territorio con una perspectiva sistémica de interacciones biofísicas y sociales, con atención en los efectos producidos adentro y fuera, a corto y largo plazo (FAO, 2007).

Pretende beneficiar tanto a la población como al medio ambiente y no sólo concentrarse en los recursos naturales. Por tanto, se busca reducir la pobreza, proveer de medios de vida que exploten los recursos de forma sustentable y mejorar las condiciones de vida tales como salud y educación.

En este nuevo enfoque además, se pasa de la gestión participativa con la comunidad a una gestión conjunta con instituciones gubernamentales, la academia, asociaciones civiles, ONGs y empresas privadas. Muchas veces los intereses de los distintos actores pueden estar contrapuestos y por tanto se busca la negociación y creación de alianzas para la planeación estratégica de largo plazo.

También se pretende lograr una descentralización administrativa y transmitir la planeación y gobernanza a las autoridades locales. Sin embargo, dado que la transmisión de recursos con transparencia y dotar de capacidades a las autoridades locales suele ser complicado, se requiere que la sociedad civil y las autoridades locales desarrollen las competencias técnicas adecuadas para incorporar el manejo de cuencas en la gobernanza del territorio.

#### 6.1.4 Manejo del agua de acuerdo a “un nuevo paradigma del agua”

El ciclo del agua puede entenderse como una combinación entre un ciclo “macro” y uno “micro”. En el ciclo “macro” el agua se evapora de los océanos y parte de ella precipita sobre las tierras continentales. Esta agua puede ser infiltrada, absorbida por las plantas y conducida hasta que retorna al mar. El ciclo “micro”, es un circuito cerrado, en el que el agua que llueve sobre una región se genera por la evaporación y transpiración local y esta agua vuelve a caer sobre este territorio. Generalmente se desprecia la magnitud del ciclo “micro” del agua, sin embargo, 410 de 710 mm en promedio que caen sobre los continentes se evaporaron de estos (Kravcik, M; Pokorny, J; Kohutiar, J; Kovac, M; Toth, E, 2007).

De acuerdo a esta información, si se desea tener un régimen de precipitación estable y por tanto contar con el agua de lluvia como un recurso renovable, se debe actuar de forma que el ciclo “micro” no se vea afectado. Para ello se debe garantizar la evaporación local y para ello mantener

los volúmenes de escorrentía originales al territorio previo al desarrollo. La cubierta vegetal cumple con esa función: reduce la escorrentía y devuelve a la atmósfera parte del agua en el subsuelo de forma controlada mediante la evapo-transpiración cerrando el círculo virtuoso (Kravcik, M; Pokorny, J; Kohutiar, J; Kovac, M; Toth, E, 2007). En cambio, cuando la mayor parte del agua que cae en un lugar no logra ser retenida y escurre, el volumen de agua que se evapora y transpira es menor lo que va deteriorando el ciclo local o micro del agua.

## 6.2 Regulaciones y certificaciones

Las regulaciones y certificaciones juegan un papel importante en la transformación de usos y costumbres así como la praxis profesional. Alrededor del mundo han surgido medidas de este tipo desde una perspectiva de la gestión integral del agua.

De las regulaciones existentes aquí sólo se expone la Sección 438 del *Energy Independence and Security Act* de Estados Unidos que al exigir que se conserve el funcionamiento hidrológico de los terrenos de los edificios federales detonó en la creación de una metodología para el manejo de escorrentía en edificios. Esta investigación retoma este método para su aplicación en la escala de la subcuenca del Guayabo y como una herramienta de diagnóstico y proyección del desarrollo urbano.

Se retoma la certificación de Desarrollos Urbanos Integrales Sustentables al ser una iniciativa del gobierno de México para responder a la problemática de la vivienda desde una perspectiva que incluye factores socio-económicos, políticos, legales, ambientales y de infraestructura existente.

Finalmente se aborda la certificación para edificaciones *Living Building Challenge* al ser más restrictiva que LEED por regirse por el principio de *Net Zero Water*, lo que implica una autonomía hídrica total, supresión de las descargas de agua residual y regulación de la escorrentía.

### 6.2.1 Manejo de escorrentía en edificios

En la sección 438 del decreto *Energy Independence and Security Act*, se exige para edificios de gobierno federal de Estados Unidos conservar la hidrología del terreno en la medida en que esto fuera técnicamente factible.

De acuerdo al decreto, cada proyecto debería realizar un análisis detallado del comportamiento hidrológico del lugar y replicar los porcentajes de escorrentía, infiltración y evapotranspiración. Los parámetros de escorrentía que se pretenden mantener son: caudales, tiempos de concentración, volúmenes de escorrentía y temperatura del agua.

Para resolver esta exigencia la *US Environmental Protection Agency* definió un criterio, totalmente integrado a las estrategias del Low Impact Development (LID), para definir la escorrentía máxima de agua pluvial aceptable de un terreno. La aceptación de este método ha sido tal que se presenta como una alternativa para cumplir con el crédito Stormwater Design: Quatity Control (SSc6.1) de la certificación LEED BD+C.

Este criterio plantea que en la práctica es equivalente retener todos los eventos pluviales de altura inferior o igual al 95% de todos ellos. Se escoge este criterio bajo el supuesto de que representa el comportamiento hidrológico en ambientes naturales no perturbados y con suelos permeables. En estos ambientes las escorrentías superficiales que se generan por la mayoría de las precipitaciones son mínimas debido a que el agua es retenida por la vegetación e infiltrada por el terreno. Sólo los eventos máximos producirían fuertes escurrimientos al saturarse el suelo. Al retener la mayoría de las tormentas y una parte de las tormentas extraordinarias se replica este comportamiento, con lo que se logra mitigar el efecto acumulativo en cantidad y calidad en los cuerpos de agua receptores (EPA, 2009).

Por tanto, para replicar este comportamiento se establece que la norma se satisface, para la mayoría de los casos, reteniendo el agua de lluvia mientras no se exceda el nivel de precipitación diaria del percentil 95 de los últimos 20 a 30 años. Para esto se toman todos los eventos mayores a 2.5 mm y se ordenan por magnitud, siendo el percentil 95 el valor que comprenda al 95% de la distribución de los eventos analizados (EPA, 2009), tal como se ilustra en la figura siguiente.

En la gráfica, en el eje vertical se indica la precipitación registrada a lo largo de un día en pulgadas. En el eje horizontal se indica el percentil correspondiente. En esta gráfica como apoyo visual se identifica con una flecha el percentil 95. Para la distribución presentada se debe ser capaz de retener dentro del terreno al menos una pulgada diaria.

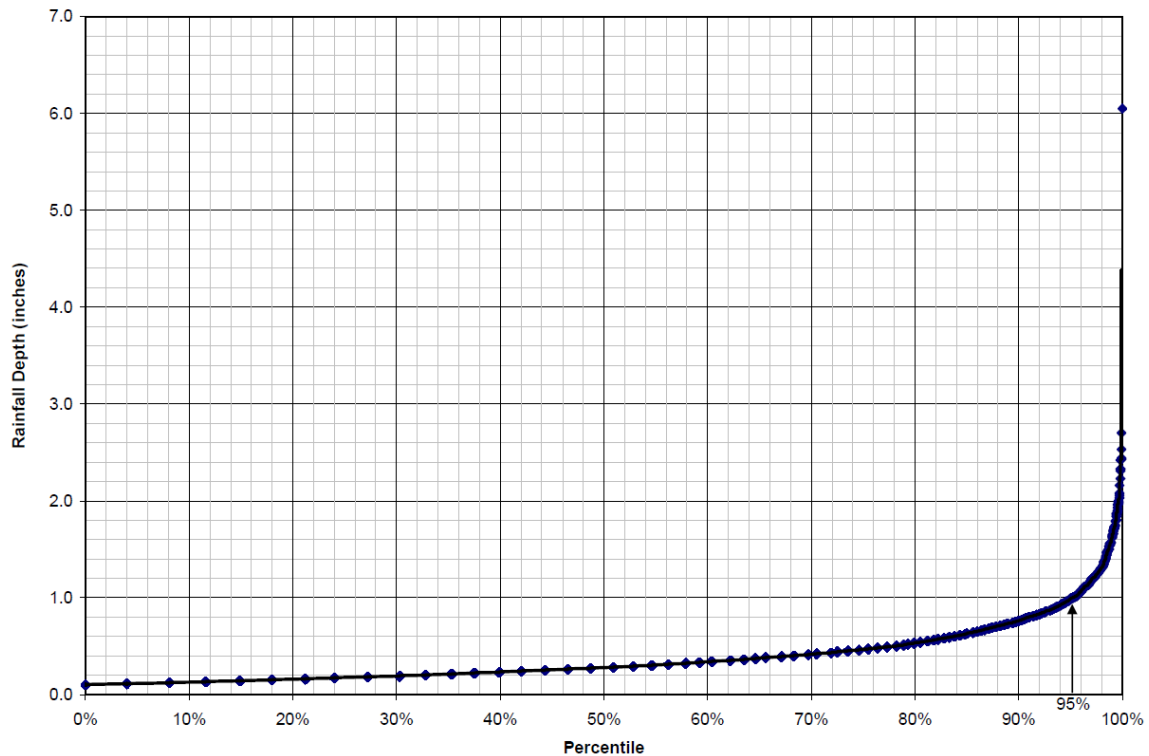


Figura 19. Ejemplo de gráfica de distribución estadística de precipitación por percentiles.

Fuente: (EPA, 2009)

Este método tiene la ventaja de que se define un valor objetivo para una zona en función de la distribución estadística de la precipitación diaria local y en la mayoría de los casos evita que se tenga que hacer un análisis a fondo de la hidrología original de cada terreno. Sin embargo, hay que tener en cuenta que es una política desarrollada para otras latitudes por lo que se debe analizar si la hipótesis del percentil 95 es el que tiene mayor correlación con los eventos pluviales de la Zona Metropolitana de Guadalajara y sus alrededores. Las preguntas que habría que realizar son las siguientes: ¿Se pueden caracterizar las tormentas de la región? De ser así ¿Cuánto duran las tormentas típicas? ¿Cuántas veces al día llueve? ¿Cuál es la intensidad de estas lluvias? ¿Qué porcentaje de tormentas se retienen en un terreno virgen con una pendiente menor a 10%? Al responder a estas preguntas, podríamos estar en posición de determinar el periodo de duración de lluvia más adecuado a analizar y el percentil representativo de las condiciones originales del terreno.

El valor del percentil escogido se vuelve entonces la tormenta de referencia para el diseño. Las estrategias implementadas sobre el territorio deberán ser tales que logren infiltrar, retener y aprovechar la totalidad del agua de lluvia para una tormenta de esta magnitud.

Existen varias formas de realizar este análisis. En el anexo I de Low-Impact Development Design Strategies(Prince George, County of, 1999) se ofrece un método para hacerlo. De igual forma, en la



sección II del documento titulado “Technical Guidance on Implementing the Stormwater Runoff Requirements for Federal Projects under Section 438 of the Energy Independence and Security Act” (EPA, 2009) se presentan varios ejemplos de cómo se consiguieron los objetivos hidrológicos aplicando técnicas de manejo en sitio (GI).

Téngase en cuenta que en los ejemplos citados, se considera que la lluvia del día se distribuye de forma uniforme a lo largo de 24 horas, el cual es el escenario más relajado. Dependiendo de la región, el patrón de tormentas cambia y por tanto la infiltración real es diferente a la estimada con ese escenario.

En la guía técnica para implementar los requisitos de escorrentía para edificios federales de la EPA se definen 4 tipos de suelo de acuerdo a sus propiedades hidrológicas (EPA, 2009). Por practicidad se clasifica el suelo en un número pequeño de clases de acuerdo a su capacidad de infiltración. Esta propiedad guarda relación con su contenido de arenas, arcillas y limos (en cuanto a su definición de acuerdo a la clasificación ingenieril de suelos).

Grupo hidrológico de suelo	Tasa de infiltración máxima (cm/hr)	Tasa de infiltración mínima (cm/hr)	Tasa de decaimiento k (1/hr)
A (arena con alta capacidad)	-	1.2 - 0.8	2
B	12.7	0.8 - 0.4	3
C	7.6	0.4 - 0.15	4
D (arcilla casi impermeable)	2.5	0.15 - 0	5

**Tabla 4.** Grupos hidrológicos de suelo con sus capacidades de infiltración.  
Fuente: adaptación de la tabla presentada por la EPA (EPA, 2009).

A partir de esta información, utilizando la ecuación de infiltración de Horton, se puede llegar a determinar el volumen de agua que el suelo puede retener a lo largo de un tiempo determinado (EPA, 2009).

t(min)	Tasa de infiltración (cm/hr)			Volumen paramétrico de infiltración (cm)			Volumen paramétrico acumulado de infiltración (cm)		
	B	C	D	B	C	D	B	C	D
0	12.700	7.620	2.540	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	7.900	4.034	1.132	1.717	0.971	0.306	1.717	0.971	0.306
20	4.988	2.193	0.520	1.074	0.519	0.138	2.791	1.490	0.444
30	3.222	1.247	0.254	0.684	0.287	0.065	3.475	1.777	0.508
40	2.151	0.762	0.139	0.448	0.167	0.033	3.923	1.944	0.541
50	1.501	0.513	0.089	0.304	0.106	0.019	4.227	2.050	0.560
60	1.107	0.385	0.067	0.217	0.075	0.013	4.444	2.125	0.573

70	0.868	0.319	0.057	0.165	0.059	0.010	4.609	2.184	0.583
80	0.723	0.286	0.053	0.133	0.050	0.009	4.742	2.234	0.592
90	0.636	0.268	0.051	0.113	0.046	0.009	4.855	2.281	0.601
100	0.582	0.259	0.051	0.101	0.044	0.008	4.956	2.324	0.610
110	0.550	0.255	0.050	0.094	0.043	0.008	5.051	2.367	0.618
120	0.530	0.252	0.050	0.090	0.042	0.008	5.141	2.410	0.626

**Tabla 5.** Tasa de infiltración instantánea y volumen paramétrico infiltrado por tipo de suelo.

Fuente: elaboración propia a partir de información y procedimientos presentados por la EPA (EPA, 2009).

Para determinar la infiltración de un sitio el método de la EPA parte de las siguientes consideraciones: La capacidad de infiltración de un territorio heterogéneo en estado natural con diferentes tipos de suelo puede calcularse como la suma proporcional de las distintas capacidades de infiltración de las superficies, siendo  $s_i$  la proporción de área con respecto a todo el territorio de una superficie y  $V_i$  el volumen paramétrico de infiltración de la misma:

$$V_{tot} = \sum s_i * V_i$$

$V_{tot}$  es la capacidad de infiltración natural del territorio analizado y deberá ser mayor al objetivo hidrológico.

Al construir sobre el territorio, se generarán áreas impermeables. La nueva capacidad de infiltración del territorio se puede calcular con la fórmula anterior, otorgando una capacidad de almacenamiento mínima (0.1 a 0.25 cm) a la proporción de áreas impermeables (EPA, 2009).

Las áreas impermeables pueden aumentar su capacidad de almacenamiento evidentemente si se instalan sistemas de captación que conduzcan esta agua a cisternas, pero también se puede lograr mediante el uso de techos verdes (3 a 15 cm de almacenamiento, dependiendo de las especificaciones constructivas). Sin embargo, su efecto no puede considerarse en la planeación general si no hay un mecanismo para garantizar que las viviendas contarán con estos dispositivos.

La infiltración de agua en el terreno requiere de áreas permeables. Estas pueden ampliar su capacidad hasta cierto límite si se introducen tecnologías verdes que ayuden a retener agua por tiempo suficiente para que esta sea absorbida, tales como depósitos de bio-retención.

Las vialidades, banquetas y otros elementos del paisaje urbano pueden ser diseñados de forma que contribuyan a reducir el volumen de escorrentía del agua pluvial. Los pavimentos permeables pueden otorgar hasta 10 cm de almacenamiento en determinadas condiciones.

Tipo de área drenada	Coeficiente de escurrimiento	
	Mínimo	Máximo
<b>Zonas Comerciales:</b>		
Zona Comercial	0.75	0.95
Zonas mercantiles	0.70	0.90
Vecindarios	0.50	0.70
<b>Zonas Residenciales:</b>		
Unifamiliares	0.30	0.50
Multifamiliares espaciados	0.40	0.60
Multifamiliares compactos	0.60	0.75
Semiurbanas	0.25	0.40
Casas habitación	0.50	0.70
<b>Zonas Industriales:</b>		
Espaciado	0.50	0.80
Compacto	0.60	0.90
Cementerios y Parques	0.10	0.25
Campos de juego	0.20	0.35
Patios de ferrocarril y terrenos sin construir	0.20	0.40
Zonas Suburbanas	0.10	0.30
<b>Calles:</b>		
Asfaltadas	0.70	0.95
De concreto hidráulico	0.80	0.95
Adoquinadas o empedradas, juntas con cemento	0.70	0.85
Adoquín sin juntar	0.50	0.70
Terracerías	0.25	0.60
Estacionamientos	0.75	0.85
Techados	0.75	0.95
<b>Praderas:</b>		
Suelos arenosos planos (pendientes < 0.02)	0.05	0.10
Suelos arenosos con pendientes medias (0.02-0.07)	0.10	0.15
Suelos arenosos escarpados (0.07 o más)	0.15	0.20
Suelos arcillosos planos (0.02 o menos)	0.13	0.17
Suelos arcillosos con pendientes medias (0.02- 0.07)	0.18	0.22
Suelos arcillosos escarpados (0.07 o más)	0.25	0.35

**Tabla 6.** Índices de escurrimiento según uso de suelo.  
Fuente: (CEA, Jalisco, s.f.)

Por contraparte, existe un método para hacer una estimación rápida pero inexacta de la esorrentía prevista para un territorio y de uso extendido localmente. Se basa en el coeficiente de esorrentía, por lo que a priori se proporciona un valor estimado de la proporción de lluvia que escurre a través de una superficie de acuerdo al uso de suelo (ver Tabla 6). Complementa al método de cálculo de infiltración empleado por la EPA al introducir pendiente y vegetación, así como un valor promedio estimado por uso de suelo de áreas urbanizadas de la forma tradicional.

No se explica cuál es la ventana de tiempo utilizada para esta estimación y estos valores permanecen iguales con respecto al tiempo e intensidad de tormentas por lo que se supone que

representa el comportamiento aproximado a largo plazo bajo las condiciones promedio del Estado de Jalisco.

### 6.2.2 DUIS

Ante los problemas que se han suscitado recientemente por una sobreoferta de vivienda de baja calidad, sin todos los servicios públicos y con mala conectividad hacia las fuentes de empleo, el Gobierno Federal a través de las Secretarías de Hacienda, Desarrollo Social, Medio Ambiente y Recursos Naturales, Energía y Economía, así como la CONAVI, INFONAVIT, FOVISSSTE, BANOBRAS, FONADIN, PROMEXICO y SHF, en el 2009 emprende una política pública para fomentar una vivienda diferente bajo una certificación de Desarrollos Urbanos Integrales Sustentables cuyas reglas aparecen en el 2010. A pesar de los fomentos económicos, tan sólo diez desarrollos a nivel nacional se lograron certificar (GPEDUIS, 2011). Actualmente este programa está detenido y se prevé que una certificación con reglas más sencillas entre en su lugar.

En el tema del agua, como prerequisites se exige verificar la disponibilidad media anual de agua subterránea y superficial de la cuenca hidrológica donde se ubica el desarrollo, así como calcular el volumen concesionado del desarrollo ( $m^3/año$ ) y el volumen requerido para abasto de agua potable del desarrollo ( $l/hab./día$ ). Además se debe generar una estrategia sustentable de consumo y la disponibilidad de los mismos a lo largo del tiempo (SHF, 2010).

En caso de que la capacidad de la cuenca fuera menor a la requerida, habría que realizar un análisis del ciclo del agua y desarrollar soluciones técnicas que expliquen de forma detallada cómo se resolvería el suministro de agua y se depurarían las aguas residuales antes de restituirse al medio natural. Además habría que presentar un estudio donde se demuestre que el uso del agua es eficiente y cómo se logra reducir el consumo (SHF, 2010).

Parte de la debilidad de este sistema de certificación es que a diferencia de LEED no presenta criterios o alternativas para cumplir con las condiciones exigidas. Aunque se basa en un sistema de puntos, la calificación de ciertos apartados depende del criterio de los revisores en vez de estar referido a parámetros objetivos y medibles como pudieran ser los objetivos hidrológicos.

### 6.2.3 Living Building Challenge 2.0

Esta certificación fue generada por Cascadia Green Building Council (CGBC) con sede en Seattle. Pretende establecer los criterios de sustentabilidad más avanzados aplicables a edificaciones de cualquier escala. La certificación se divide en temas llamados “Pétalos”: Sitio, Agua, Energía, Salud, Materiales, Equidad y Belleza. Para lograr la certificación se requiere cumplir con los 20

imperativos. Estos se evalúan en su desempeño real y no de acuerdo a modelos o simulaciones (ILBI, 2010).

El tema del agua, obedece al principio de Net Zero Water que se explica en los dos imperativos de este Pétalo:

- 100% del agua empleada por el edificio debe provenir de agua capturada de lluvia o de un circuito cerrado que reutilice después de un tratamiento el agua previamente empleada sin el uso de productos químicos.
- 100% del agua de lluvia y de las aguas residuales deben de ser manejadas en el lugar de forma que suministren el agua requerida para consumo al interior o sean liberadas en lugares adyacentes a través de un flujo natural aceptable en calidad y cantidad para la recarga de agua subterránea, uso agrícola o necesidades de un edificio vecino.

En el documento titulado “Net Zero Water & Integrated Water Management” (Sisolak, Joel; Spataro, Kate, 2011) la CGBC explica cómo se pueden cumplir estos imperativos mediante el uso de Best Management Practices (BMP).

Esta certificación tiene el carácter de reto y se erige como un modelo de referencia hacia donde sería deseable llegar. Sin embargo se requiere revisar qué pasos se tendrían que dar para su implementación de forma masiva y que implicaciones tendría.

### 6.3 Criterios de riesgo asociados a la escorrentía urbana

Eventos pluviales extremos combinados con una insuficiente capacidad del sistema de drenaje pueden resultar en inundaciones de áreas urbanas y problemas asociados a la circulación vehicular y peatonal (aquaplaning, salpicaduras, peligro de arrastre y vuelco para peatones y vehículos, etc.).

Con el objetivo de garantizar la seguridad de la población, se han definido diferentes criterios de riesgo usualmente relacionados al calado o altura de las aguas y la velocidad de la corriente. La tabla 4, muestra una recopilación de criterios relacionados al calado.

Fuente	Referencia	y <sub>máx</sub> (m)	Justificación del criterio	Ámbito de estudio
Manual de Drenaje de la Ciudad de Denver (EEUU)	Wright-Mc Laughlin, 1969	0.45	Altura máxima próxima al límite a partir del cual un vehículo empieza a perder adherencia con el pavimento y a flotar	Urbano
Monografía Colegio de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (España)	Témez, 1992	1.00	Altura máxima para una situación de peligro para individuos en cauces naturales y llanuras de inundación	Rural
Manual de Drenaje del Contado de Clark (EEUU)	CCRFCFCD, 1999	0.30	Límite para que la escorrentía no sobrepase el bordillo	Urbano
Criterio de Mendoza (Argentina)	Nanía, 1999	0.30	Altura máxima para evitar el ingreso de agua pluvial en viviendas y comercios	Urbano
Consejo para la Agricultura y la Gestión de los Recursos (Australia y Nueva Zelanda)	ARMC, 2000	1.20 – 1.50	No se refiere sólo a la estabilidad de los individuos sino también a daños generales que la inundación puede provocar.	Urbano
Riesgos hidro-meteorológico (Suiza)	Belleudy, 2004	0.00 - 1.00	Este criterio propone varios calados máximo en función del uso del suelo y se refiere a inundaciones provocadas por desbordamiento de ríos	Urbano / Rural
Picba07: Plan Integral de Alcantarillado de Barcelona 2007	CLABSA, 2007	0.06	Se admite, para una lluvia con periodo de retorno de 10 años, tener los dos carriles laterales inundados.	Urbano

**Tabla 7.** Listado de diferentes criterios de riesgo de calado máximo.  
Fuente: (Gómez, M.; Russo, B., 2009)

De igual forma, en la tabla 5 se listan algunos criterios que definen la velocidad máxima aceptable de la corriente.

Fuente	Referencia	v <sub>máx</sub> (m/s)	Justificación del criterio	Ámbito de estudio
Monografía Colegio de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (España)	Témez, 1992	1.00	Velocidad límite para que un individuo pueda vencer a nado la resistencia del flujo	Rural
Consejo para la Agricultura y la Gestión de los Recursos (Australia y Nueva Zelanda)	ARMC, 2000	1.50	Velocidad límite, para calados pequeños, que supone la pérdida de capacidad por parte de un individuo de caminar por el agua	Urbano
Riesgo hidro-meteorológico (Suiza)	Belleudy, 2004	0.25 - 1.00	Propone varias velocidades máximas en función del uso del suelo y se refiere a inundaciones provocadas por desbordamiento de ríos	Urbano / Rural

**Tabla 8** Listado de diferentes criterios de riesgo de velocidad de la corriente máxima.  
Fuente: (Gómez, M.; Russo, B., 2009)



De forma alternativa se llevó a cabo un experimento que reproducía las condiciones de la calle. Con base a los resultados observados de estabilidad en diferentes individuos, se definen los siguientes umbrales (Gómez, M.; Russo, B., 2009):

- Riesgo alto:  $v > 1.88 \text{ m/s}$
- Riesgo intermedio:  $1.88 \text{ m/s} > v > 1.56 \text{ m/s}$
- Riesgo leve:  $1.56 \text{ m/s} > v > 1.51 \text{ m/s}$

En cuanto al arrastre de peatones por una corriente, estudios experimentales sugieren que el riesgo es una combinación entre el calado del flujo (en metros) y la velocidad (en metros por segundo). Por tanto se sugiere definir un límite en base al producto de ambas variables. Según recientes estudios, para adultos, el límite de seguridad definido por el producto suele estar en el rango de 0.5 y 1. (Abt, S.R.; Wittler, R. J.; Taylor, A.; Love, D. J., 1989; CCRCD, 1999). La tabla siguiente resume varios criterios relativos a este producto.

Fuente	Referencia	$v \cdot y$ (m <sup>2</sup> /s)	$v^2 \cdot y$ (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )	Justificación del criterio	Ámbito de estudio
Agencia Federal Americana para la Gestión de Emergencias (EEUU)	FEMA, 1979	0.56	-	El valor del producto representa la condición límite a partir de la cual un peatón adulto empieza a perder estabilidad (el estudio argumenta que para niños este producto bajaría sensiblemente) límite representa el comienzo	Urbano / Rural
Estudio sobre la estabilidad humana en zonas de riesgo (EEUU)	Abt, 1999	0.70 2.12	-	Los valores del producto límite $v \cdot y$ , hallados a través de test experimentales, varían dependiendo de la altura y del peso de las personas (a mayor producto peso por altura, mayor estabilidad)	Urbano / Rural
Monografía Colegio de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (España)	Témez, 1992	0.50	-	Altura máxima para individuar una situación de peligro para individuos en cauces naturales y llanuras de inundación	Rural
Manual de Drenaje del Contado de Clark (EEUU)	CCRCD, 1999	0.55	-	Altura máxima para garantizar que la escorrentía no sobrepase el bordillo de la acera	Urbano
UPC (España)	Nanía, 1999	-	1.00	Estudio teórico de la estabilidad de un peatón frente al fenómeno del deslizamiento	Urbano
Proyecto Europeo RESCDAM (Finlandia)	Reiter, 2000	0.25 0.70	-	Este criterio se refiere a experiencias experimentales. Los dos valores presentados se refieren a pérdida de estabilidad frente al flujo para individuos adultos y niños	Rural
Curso de Hidrología Urbana (España)	Gómez et al, 2008	0.45	-	Estudio teórico de la estabilidad de un peatón frente al fenómeno del vuelco	Urbano

**Tabla 9.** Listado de diferentes criterios de riesgo de velocidad de la corriente máxima.  
Fuente: (Gómez, M.; Russo, B., 2009)

## 6.4 Tecnologías alternativas de manejo de agua

### 6.4.1 SuDS / WSUD / BMP

Ante el panorama actual ya planteado en el que a nivel mundial las ciudades enfrentan dificultades para garantizar el abasto de agua potable o de evitar ser inundadas e incluso ambas, han aparecido alternativas al modelo dominante de manejo de agua casi de forma simultánea en diferentes partes del mundo.

Tal es el caso de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sustentable, (en inglés Sustainable Drainage Systems, SuDS tanto en inglés como español), también conocidos en España como Técnicas de Drenaje Sostenible (Abellán, Ana, 2013), Water Sensitive Urban Design (WSUD) en Australia, Best Management Practices (BMP) en Estados Unidos, etc. Los SuDS son “elementos integrantes de la infraestructura (urbanohidráulico-paisajística) cuya misión es captar, filtrar, retener, transportar, almacenar e infiltrar al terreno el agua, de forma que ésta no sufra ningún deterioro e incluso permita la eliminación, de forma natural, de al menos parte de la carga contaminante que haya podido adquirir por procesos de escorrentía urbana previa. Todo ello tratando de reproducir, de la manera más fielmente posible, el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización o actuación del hombre.” (Perales, Sara, 2008).

Bajo la idea fundamental de la integrar el ciclo completo de agua a la planeación y operación de los entornos humanos, se enuncian principios y/u objetivos comunes tanto en la literatura de SuDS (Ibíd.) como en la de WSUD (BMT WBM 2009):

- Preservar la calidad del agua proveniente de escorrentías, evitando la introducción de contaminantes;
- Mantener el funcionamiento hidrológico natural de las cuencas, lo cual implica respetar los cauces naturales y conservar volúmenes de escorrentía y caudales pico en el terreno a edificar de tal forma que no se altere la dinámica hidrológica de la cuenca. Esto exige la utilización de elementos de retención y/o retardo además de reducir al mínimo las superficies impermeables, así como tener extensiones importantes con cubierta vegetal;
- Integrar al paisaje el manejo del agua de escorrentía, lo cual reduce costos de las infraestructuras de drenaje mientras que genera plusvalía al mejorar la imagen urbana, además de que se aumenta la conexión de los residentes con el agua;
- Reducir la demanda de agua potable al aprovechar las aguas pluviales y reutilizar las aguas grises, de esta forma se propicia la autonomía hídrica;
- Minimizar la generación de aguas negras y los volúmenes generados tratarlos de forma que puedan ser reutilizados o descargados a cuerpos de agua sin alterar su funcionamiento biológico e hidrológico en estado natural

En este tenor, en el artículo “Planificación urbana sostenible del agua”(Abellán, Ana, 2015) se menciona brevemente la regulación del crecimiento urbano en función de las escorrentías,

destinando el desarrollo urbano a las zonas donde los impactos sean más fáciles de resolver. En este punto en particular parece haber un campo no explotado.

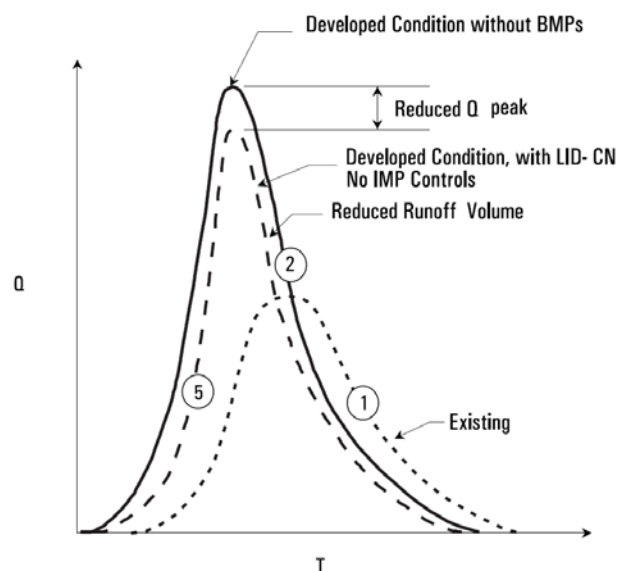
Entre los beneficios reportados (Perales, Sara, 2008) por la aplicación de este nuevo enfoque se encuentran:

- 1) Al reducirse los volúmenes de escorrentía y los caudales pico se mitiga el riesgo de inundación aguas abajo;
- 2) Hay menor alteración en las dinámicas naturales de los cuerpos de agua receptores, tanto en calidad como en cantidad;
- 3) Se disminuyen las demandas de abasto de agua potable y los volúmenes generados de aguas residuales;
- 4) Se simplifica y se mejoran los resultados de las plantas de tratamiento al homogeneizarse los contaminantes presentes en las aguas y reducirse el volumen a depurar;
- 5) Al aumentar la superficie con cubierta vegetal se disminuye el efecto “isla de calor” en las ciudades;
- 6) Aumento de la plusvalía debida a la calidad paisajística del entorno y el aumento de áreas recreativas
- 7) Los consumos de energía derivados de la climatización de edificaciones y por la operación de plantas de tratamiento se disminuyen de forma significativa;

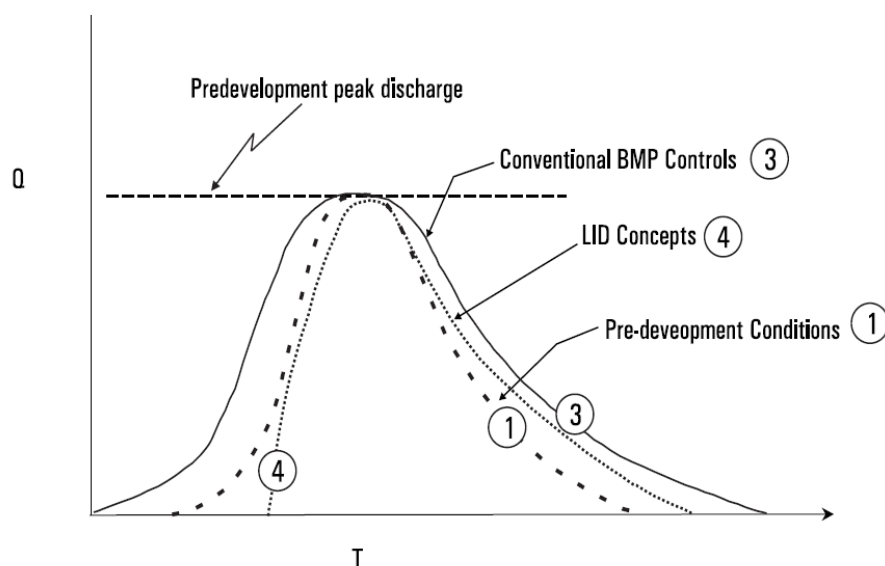
#### 6.4.2 Low Impact Development (LID)

Low Impact Development (LID) comparte los mismos principios que las Best Management Practices (BMP) en el manejo de las escorrentías superficiales. Sin embargo, su enfoque es totalmente distribuido ya que se vale de pequeños elementos que se integran fácilmente al entorno, repartidos en la mayor cantidad de puntos posibles a los que refiere como Integrated Management Practices (IMP) que actual cerca del origen de los escurrimientos y por tanto eliminan la necesidad de un elemento de BMP centralizado. Sin embargo, antes de recurrir a los IMPs, el método exige una planeación del sitio que minimice los impactos a la hidrología local por el diseño (Prince George, County of, 1999).

LID, de acuerdo a sus autores, puede lograr mejores resultados que las BMPs, como muestra en las gráficas siguientes. En la figura 19, se comparan condiciones originales o previas al desarrollo (1), posteriores al desarrollo sin emplear BMPs o LID (2), desarrollo con planeación de sitio utilizando los conceptos de LID, pero sin emplear IMPs (5). Nótese que aunque se logra disminuir el caudal pico con la planeación del sitio bajo los conceptos LID, las condiciones de caudal pico, volumen de escorrentía y tiempo de concentración siguen siendo desfavorables. Una vez que se introducen las IMPs (4), tal como se observa en la figura 20, se logra conservar el caudal pico original, se retarda el inicio de los escurrimientos, más allá de las condiciones originales y el volumen de escorrentía es menor al logrado con los controles de las BMPs(3) y casi similar al original (1) (Prince George, County of, 1999).



**Figura 20.** Gráfica que compara los hidrogramas de un territorio bajo condiciones normales con este posterior a su urbanización y con la implementación de medidas de planeación LID.  
Fuente: (Prince George, County of, 1999).



**Figura 21.** Comparación de hidrogramas de un territorio entre el funcionamiento hidrológico natural original, el territorio urbanizado con controles BMP y urbanizado con conceptos de LID y empleando IMPs.  
Fuente: (Prince George, County of, 1999).

### 6.4.3 Humedales artificiales (reed bed systems)

Un humedal es una superficie cubierta por agua con una periodicidad o duración que permiten mantener estas condiciones y con una profundidad menor a 60 cm. La vegetación presente suele ser juncos, carrizos, jacintos, lirios y estas permiten las condiciones para que se generen

comunidades de bacterias que se agrupan formando una especie de película. Estas plantas además permiten filtrar los componentes orgánicos y minerales presentes en el agua a la vez que la oxigenan. Al limitar la penetración de luz solar, el crecimiento de algas se controla.

Un humedal artificial pretende aprovechar estas capacidades de los humedales para tratar las aguas residuales con un bajo consumo de energía y mínimo mantenimiento. Se clasifican en dos de acuerdo a la circulación de las aguas: en Sistemas de Flujo Libre (FWS) y Sistemas de Flujo Subsuperficial (SFS).

En el FWS la vegetación está sembrada en el suelo y el agua corre superficialmente expuesta sobre un suelo con poca capacidad de absorción. Los niveles usuales son entre 0.1 y 0.6 m. Por otro lado, en el SFS, el agua se hace fluir a través de canales rellenos de arena y gravas. Encima de estos se coloca la tierra. Las raíces de las plantas penetran hasta el fondo. En ambos casos se garantiza la impermeabilización del fondo para asegurar un flujo controlado (Lara-Borrero, Jaime Andrés, 1999).

#### 6.4.4 Biodigestores

Un biodigestor es un sistema que genera biogás a partir de la biomasa o materia orgánica obtenida en un proceso biológico (como madera, rastrojo, estiércol) gracias a un proceso de fermentación anaeróbica por medio de bacterias (Olaya-Arboleda, Yeison, González-Salcedo, Luis Octavio, 2009). El biogás es una mezcla compuesto por metano (en un 40 a 70 %), dióxido de carbono (30 a 60%) y otros gases como hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y sulfuro de hidrógeno (en pequeñas proporciones).

Se pueden construir biodigestores de forma sencilla y económica, representando un apoyo para comunidades rurales y estos generalmente usan material vegetal y excremento como combustible (Elizondo, Dagoberto, 2005).

También es posible a partir de aguas residuales extraer biogás. Para este propósito se requiere de concentraciones altas de materia orgánica suspendida (de 20 a 100 g/l). Para esto se requiere un pretratamiento que filtre agua hasta alcanzar la concentración apropiada (Pistonesi, Carlos, Haure, José Luis, D'Elmar, Roberto, 2010).

#### 6.4.5 Planta de tratamiento de aguas residuales dual, con separación de las aguas jabonosas o grises y de las aguas negras (Patente solicitada WO 2008120963 A1)

El sistema propuesto a patente es un sistema centralizado de tratamiento de aguas grises y negras (cada una por separado) provenientes de las viviendas de un fraccionamiento. Fue desarrollado por Jorge Asali.

Las aguas grises tratadas son devueltas hacia las viviendas para un segundo uso. De esta forma se consigue ahorrar hasta el 55% del agua potable que se requiere en los hogares. Las aguas se separan desde su origen: el agua jabonosa proveniente de regaderas y lavado de ropa, del agua negra proveniente de escusados (WC), tarjas de baño, cocinas y lavado de pisos dentro de los hogares.

El tratamiento del agua jabonosa consiste en estabilizar su pH, oxidación, decantación, adición de polímeros, filtrado a través de arena sílica y antracita, desinfección con ozono, hipoclorito de sodio y con luz UV. Antes de devolverla a los hogares se suaviza. Esta agua será destinada para uso en WC y lavado de ropa.

En la planta de aguas negras se desbasta y se criba, luego se hace pasar por un biodigestor aeróbico y anaeróbico, se decanta, se filtra a través de arena sílica. Para matar las bacterias se usa hipoclorito de sodio y luz ultravioleta. Se devuelve a las casas para riego, lavado de autos, lavado de pisos y uso de fuentes. El agua sobrante se emplea para regar los jardines de áreas comunes.

Este método se diferencia de las plantas de tratamiento de fraccionamientos convencionales en que también maneja un circuito para aguas grises que devuelve a las viviendas para un segundo uso.



#### 6.4.6 Recolección doméstica de agua pluvial

Se sabe que los romanos contaban con una apertura en el techo llamada *compluvium* por la cual hacían escurrir el agua de los tejados convergiendo hacia un atrio, donde había un *impluvium* o cisterna de agua pluvial. Por su parte, los mayas de Yucatán también contaban con cisternas en el piso, aunque aquí el agua era conducida mediante la pendiente hecha en el piso para hacer confluir el agua hacia la boca de la cisterna. El día de hoy estos principios básicos se mantienen vigentes, aunque la contaminación atmosférica y los niveles de higiene actuales han requerido de la incorporación de sistemas de filtrado y tratamiento de las aguas pluviales.

Los techos inclinados han sido una solución estructural de cubierta ligera, al desalojar rápidamente el agua de su superficie. Con el fin de captarla, es cuestión de colocar canaletas a los extremos de los aleros y conducir el agua hacia la cisterna.

Mientras tanto, las azoteas o cubiertas horizontales representan el común de las viviendas en nuestra ciudad. Para evitar acumular agua (lo cual implica cargas adicionales a la estructura y posibles infiltraciones) se generan pendientes ligeras (2%) hacia los diferentes bajantes de aguas pluviales. La porosidad y textura de los materiales empleados para recubrir pueden afectar, reduciendo el volumen captado con respecto al que cayó sobre la superficie.

Para las áreas no cubiertas, por reglamento se crean pozos de absorción que permiten la infiltración de aguas pluviales a diferentes profundidades y estratos, además que permite que el agua se vaya infiltrando poco a poco. Pero también se puede conducir por pendiente el agua que cae en superficies construidas no techadas como terrazas, patios, estacionamientos, andadores, etc., hacia bocas de tormenta integradas al circuito de agua pluvial. Algún mecanismo de filtrado será necesario porque el agua podrá arrastrar polvo, tierra, hojas secas o basura.

Para la captación de agua de niebla, se utilizan mallas grandes de polipropileno extendidas verticalmente contra el viento dominante. Esta malla puede capturar pequeñas gotitas de agua (1 a 40µm). Estas son escurridas hacia colectores. Si se implementa un sistema que deseche el primer flujo de agua, esta agua se podría beber, siempre y cuando el aire no esté contaminado.

Existen sistemas de prefiltrado usualmente instalados en los techos, con el objetivo de evitar que objetos tapen los bajantes de agua pluvial. Los más sencillos pueden ser en forma de coladeras para los bajantes en cubiertas planas, o de rejillas sobre las canaletas para techos inclinados. Los drenajes sifónicos crean una succión, por lo que a diferencia de las coladeras normales dependen únicamente de la gravedad para desaguar una cubierta plana y no requieren de una inclinación para operar. Otro sistema de prefiltrado llamado de primer flujo desvía fuera del circuito las primeras aguas de lluvia que suelen arrastrar basura u objetos que pudieran contaminar el agua pluvial.

Los sistemas de filtrado de vórtice, se emplean al extremo del sistema de conducción, justo antes del tanque. Permiten filtrado continuo a la vez que residuos son desviados junto con el 15% del agua.

Un sistema de filtrado de bajo costo y fácil implementación que le permite ser tecnología de apropiación, consiste en dos etapas: la primera con tanques de sedimentación para asentar arenas, arcillas y otros sólidos que por su peso caigan al fondo y en la segunda etapa se pasan por un tanque con gravas de diferentes grosores. El mantenimiento de los tanques de sedimentación requiere que sean limpiados antes y después de la temporada de lluvias. La limpieza del tanque de gravas puede realizarse cada dos o tres años lavándola.

Para el almacenamiento del agua existen varias alternativas. Están las cisternas que por su forma suelen ser cilíndricas, esféricas o como prismas rectangulares. Las cilíndricas funcionan bien enterradas porque distribuyen las cargas del terreno y por tanto son más eficientes estructuralmente que las de planta rectangular, por lo que es fácil encontrar de lámina, asbesto o alguna fibra plástica. Las esféricas se utilizan más bien en contenedores elevados sobre el nivel del suelo. Los de planta rectangular son comunes como aljibes en nuestro entorno y usualmente son contruidos a base de ladrillo, block o concreto, con refuerzos de acero y se puede aprovechar la cimentación para contruirlas. Una tendencia reciente para abaratar costos y reducir tiempo de construcción es emplear cisternas prefabricadas por rotomoldeo de fibras plásticas.

Otra alternativa de almacenamiento son los estanques, que tienen la desventaja de perder el agua por evaporación aunque pueden tener un uso ornamental o productivo (piscicultura, cría de aves acuáticas). Para evitar que el agua se filtre, se recubre la superficie de la base con geomembrana de PVC.

La cisterna o el estanque se diseñan de acuerdo al espacio disponible y los requerimientos de la vivienda de acuerdo al uso y número de usuarios, lo que determinaría una dotación requerida diaria. Idealmente se pretendería almacenar toda el agua que ha de ser consumida durante el año o por lo menos durante el periodo de sequía. Hay que tener en cuenta la superficie con la que se cuenta para recolectar el agua y el nivel de precipitación de la región. El patrón de lluvias también influye en las dimensiones ya que se puede optimizar si se considera el flujo de agua captada y usada, ya que no se espera que el agua caiga toda al mismo tiempo.

En caso de que el agua captada exceda la capacidad del tanque, se añaden conductos de salida a partir de un nivel máximo de seguridad. Esta agua puede ser redirigida a pozos de absorción, a un canal de aguas pluviales o a la alcantarilla.

#### 6.4.7 Sistema Integral de Abasto y Saneamiento de Agua con descarga cero (SIASA-0)

Es un sistema desarrollado y perfeccionado por el Ing. Eduardo León Garza. Este sistema le valió el tercer lugar del Gran Premio Mundial del Agua Rey Hassan II de Marruecos en el 2006 (García-Rivero, José Luis, 2007).

El Ing. León Garza a aplicado este sistema desde 1985. El primer antecedente fue con una casa de campo en Nepantla. En 1994 lo uso en el sector comercial con Automóviles Metropolitanos. En el 2007 obtuvo el Premio Nacional de Vivienda por el condominio horizontal de interés medio alto Cañadas del Lago. También se aplicó en 546 viviendas de interés popular en INVIGEO Azcapotzalco (León-Garza, Eduardo, 2006).

Es un sistema pensado para vivienda que pretende disminuir el consumo de agua proveniente de la red pública de suministro de agua y eliminar la descarga de aguas negras al exterior.

En una etapa del sistema se recupera agua pluvial, se filtra y se almacena en la cisterna de agua de primer uso, junto con el agua de la red. Esta agua será utilizada en el lavamanos, regadera y fregadero. El agua residual es conducida a la etapa de aguas grises.

En la segunda etapa, el agua pasa primero por un tanque sedimentador y desnatador, luego por el ozonificador e inyector de aire para desinfectar y clarificar y almacenada en el tinaco de agua de segundo uso. Esta agua será utilizada en el escusado, para lavado de ropa y limpieza de la casa y resto de tomas de agua. El agua residual se conduce al tanque de aguas negras, con la particularidad de que la proveniente del escusado es pasada por una rejilla separadora de papel.

En la tercera y última etapa las aguas negras son tratadas. En un primer momento pasan por una fosa séptica, compuesta a su vez por una trampa de sólidos y un biodigestor anaerobio. Pasa por un filtro de gravas y carbón activado inmediatamente después. Luego entra a un circuito de recirculación donde el primer elemento es un tanque de recirculación donde hay un mecanismo desnatador sedimentador forzado, antes de pasar al tanque de aguas tratadas. Luego se le inyecta ozono y aire, se pasa por un filtro de poliéster y es devuelta al tanque de recirculación. Las aguas tratadas pueden ser empleadas para riego o pueden ser infiltradas en el subsuelo mediante campos de oxidación. Requiere un mantenimiento continuo que implica la remoción de nata de grasa de la caja (Díaz-Cuenca, Elizabeth, Alvarado-Granados, Alejandro, Camacho-Calzada, Karina 2012).

Este sistema emplea ozono por ser un desinfectante natural que no deja residuos además de que se produce en la naturaleza mediante rayos y descargas eléctricas en el aire. Por tanto, para hacer la ozonificación se conduce el agua a través de un conducto reducido con perforaciones para incorporar aire (Venturi) y se hace pasar un arco eléctrico a través de la mezcla. Además el ozono oxida los metales pesados disueltos y al oxidarse estos caen al fondo. Otros óxidos se volatizan (García-Rivero, José Luis, 2007).

#### 6.4.8 Sistema Unitario de Tratamiento y Reuso de Aguas, Nutrientes y Energía de Xochicalli (SUTRANE-1970)

Este sistema busca al igual que el anterior busca resolver el problema del agua de forma integral. Se enfoca en el tratamiento de aguas grises y negras mediante métodos pasivos y naturales. Es perfectamente compatible con un sistema de captación de agua pluvial.

Este sistema cuenta con dos vertientes: la de aguas jabonosas y la de aguas negras. Al primero pertenecen las descargas del fregadero, lavamanos, regadera y lavadero. El segundo recibe las descargas del WC.

Para tratar las aguas jabonosas primero se les hace pasar por una trampa de grasas. Posteriormente pasan a un filtro bioquímico, constituido por una fosa de ferrocemento donde la biodegradación es aeróbica por la acción de lirios, la luz solar y el aire. Las aguas negras pasan a un biodigestor anaeróbico, donde la degradación ocurre por medio de bacterias.

Las aguas resultantes de sendos procesos se hacen converger a un solo registro. De aquí se conduce a un campo secundario o filtro biofísico para optimizar el proceso de biodegradación. Este filtro consta de varias zanjas o canales impermeabilizados (para evitar infiltraciones al subsuelo) los canales se cubren con capas de piedra, colocando primero piedra bola, después gravilla, grava y finalmente arena. Sobre ellos se extiende una capa de tierra vegetal para construir un huerto. Finalmente las aguas excedentes enriquecidas son recolectadas en una fosa de ferrocemento.

Este sistema requiere un mantenimiento cada mes para extraer la nata de grasa del biodigestor. Funciona mejor si se usa jabón de barra en vez de detergente en polvo, ya que este último mata las bacterias

## 7. Descripción de la metodología

Sugiero un párrafo introductorio que describa la metodología en lo general y liste sus etapas e instrumentos.

### 7.1 Diseño de instrumentos de intervención

#### 7.1.1 Recorrido crítico (visita de campo)

El recorrido crítico consiste en seguir una trayectoria preestablecida a través de un territorio con la intención dirigir la observación directa a puntos relevantes o significativos para la investigación ante la dificultad de cubrir el área por completo.

El trayecto podría definirse por un análisis previo donde se haya definido los puntos que pudieran aportar información clave o como una ruta que logre la mayor cobertura de los aspectos representativos en una aproximación exploratoria.

Conviene realizar registros fotográficos y de video en parte como evidencia pero también para capturar información o mayor detalle que pudiera no haber sido percibido por el investigador. Las notas de campo y listas de cotejo también son un buen recurso de apoyo para registrar detalles para su posterior análisis. Además, conviene apoyarse en mapas o sistemas de navegación que permitan localizar espacialmente las observaciones. También se pueden hacer capturas con GPS de las coordenadas de varios puntos marcados. Al concluir el recorrido, parte de la información registrada pudiera ser integrada a un registro cartográfico.

Se hizo un registro escrito de lo observado a través de listas de cotejo diseñadas para la visita (ver anexos) así como un registro fotográfico de lo observado en cada punto (también en los anexos).

### 7.1.2 Análisis geo-sociodemográfico inferencial

Es una herramienta que emplea la técnica de observación indirecta para obtener información. Esta observación en general tendría la particularidad de ser selectiva y dado que no se realiza en campo el investigador en principio no debería de tener dificultad en que esta sea estructurada y sistemática cuando el objetivo está ya definido. Se apoya en Sistemas de Información Geográfica (SIG o en inglés *Geographic Information System*, GIS) donde los diferentes aspectos de un territorio son organizados dentro de una base de datos geográficamente referenciada. Por tanto el observador se sirve de un programa de cómputo para manipular las bases de datos, visualizar las características del territorio y operar entre diferentes capas de atributos para obtener información nueva (geo-procesamiento o álgebra de mapas).

Para llevar a cabo el análisis geo-socio-demográfico inferencial se requieren de bases de datos que describan los elementos naturales y acentos geográficos relevantes para el estudio así como información estadística sobre los aspectos socio-demográficos que caracterizan al espacio. A partir del entrecruce entre las condiciones físicas y las demográficas se pueden derivar inferir condiciones o situaciones posibles.

Evidentemente se trabaja con una abstracción de la realidad. De acuerdo a la escala algunos elementos podrían aparecer o no. Por otro lado, quien genera las bases de datos se enfrenta a la imposibilidad en tiempo y recursos que implica capturar información en cada punto del territorio. La información capturada es una imagen congelada de un momento dado y este no necesariamente es el mismo para todos los puntos de la base de datos. El territorio está en continuo cambio ya sea por la actividad humana o por fenómenos naturales.

Para efectos del presente estudio, este análisis se emplea para determinar puntos de riesgo tanto para la población, para la infraestructura o para la calidad del agua. La mayor parte de las bases de datos provienen del INEGI, tanto resultados del censo 2010, curvas de nivel, cartas temáticas 1:250000 (edafología, geología, hidrología, vegetación), etc., así como otras bases de dato de trabajo generadas por la academia del ITESO.

De este modo, se pueden identificar zonas con riesgo de inundación por ser áreas bajas o planas donde el agua podría acumularse. Las viviendas e infraestructura ubicada dentro del polígono señalado para una tormenta de una magnitud dada corren este riesgo.



Por otro lado, el agua podría desbordarse o desviarse en cauces con secciones reducidas ante caudales superiores a su capacidad. Ante obstrucciones en el cauce, cuando el caudal es grande este tratará de abrirse camino y se llevará lo que encuentre a su paso. Aquí se deben analizar los caudales y velocidad de la corriente en relación a estructuras existentes, desviaciones del cauce, secciones de canales, etc.

Conociendo la infraestructura de drenaje y la presencia de granjas, cultivos e industria se puede prever también puntos de descarga de aguas residuales al arroyo.

La forma de registrar la información generada es a través de la creación de nuevas bases de datos que contengan los resultados de las operaciones de geo-procesamiento. Estas bases de datos contendrán aspectos asociados a posiciones en el espacio y con atributos numéricos o cualitativos.

Para la presentación de los resultados, se generan mapas, donde el investigador tiene la libertad de definir los elementos a mostrar, en qué escala y con qué apariencia.

### 7.1.3 Caracterización hidrológica por afluentes a distintos órdenes

Esta herramienta pretende conocer las características hidrológicas de un arroyo y sus afluentes, clasificar estos de acuerdo a su relevancia e identificar puntos críticos y de interés para su observación y su regulación para mitigar posibles riesgos a la población.

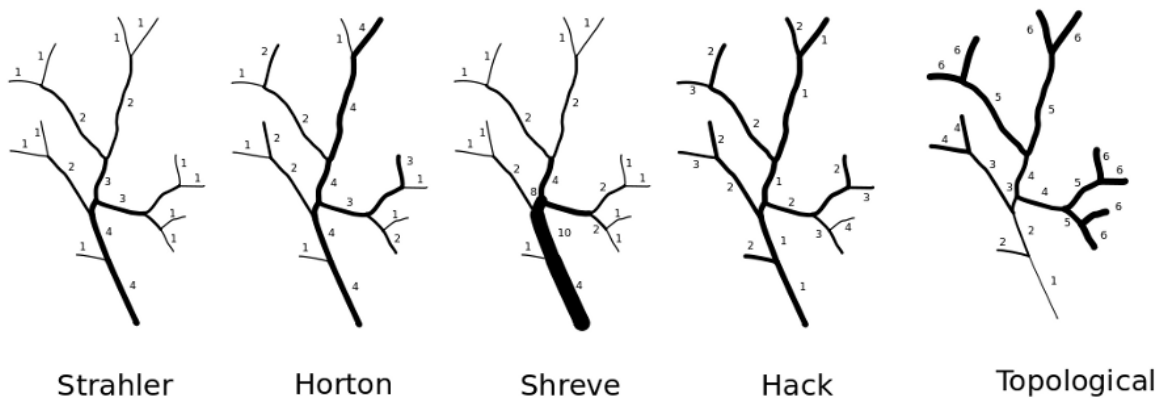
Los datos que interesan son: inclinación o pendiente que afecta al cauce, área drenada, longitud del segmento analizado, permeabilidad y fricción del terreno o el índice de escurrimiento, sección del cauce.

Estos datos se pueden obtener si los rasgos hidrográficos se encuentran en una base de datos como vectores de un SIG. A partir de consultas u operaciones de geo-procesamiento se van obteniendo cada uno de los datos requeridos.

Adicionalmente, el INEGI ha puesto a disposición del público en general una herramienta llamada SIATL, que es un simulador de flujos en las cuencas hidrográficas del país que permite realizar esto mismo de forma gratuita, interactiva y simple, sin necesidad de contar con una herramienta de SIG. A partir de estos datos se estimará a partir de fórmulas empíricas el caudal pico, volumen drenado, tiempo de concentración y la velocidad máxima para una tormenta dada. SIATL también tiene la capacidad de calcular el caudal pico y el tiempo de concentración, requiriendo del usuario los parámetros de la tormenta de diseño y el índice de escurrimiento.

Es necesario calcular estos valores para todos los afluentes y subafluentes significativos, siendo el área drenada y longitud parámetros clave para su inclusión. Para realizar estos cálculos existen un sinnúmero de fórmulas empíricas, siendo la fórmula de Kirpich la más conocida.

Una vez hechos los cálculos de los distintos afluentes, se pueden clasificar entonces por el caudal pico o por el volumen drenado utilizando algún método de clasificación ordinal, ya sea Strahler, Shreve, Horton, topológico u otro.



**Figura 22.** Diferentes métodos ordinales de clasificación de afluentes.  
Fuente: s.f.

De los resultados también se puede determinar puntos críticos y de riesgo, de acuerdo a los caudales pico y velocidades de flujo mayores a los umbrales prefijados. Los caudales se pueden contrastar contra la sección efectiva del canal.

Durante el trabajo de campo, ante la necesidad de crear una nomenclatura que identificara a los diferentes afluentes se planteó la siguiente:

Partiendo de la desembocadura de la cuenca en dirección aguas arriba, al cauce final se le da valor de 1. Cuando se llega a un punto de confluencia, como las corrientes se dividen en dos a partir de este punto y hasta encontrar otro punto de confluencia la corriente principal cambia su nombre: al nombre que tenía anteriormente se le otorga el sufijo 1, mientras que al afluente le corresponde el sufijo 0. Este procedimiento se aplica de forma recursiva tanto a la corriente principal como a los afluentes. Este método de clasificación se explica con más detalle en la sección de Anexos en lo referente a caracterización hidrológica.

Una vez terminada la clasificación de cada segmento, utilizando SIATL se extrajo la siguiente información para cada punto de afluencia:

- Longitud media de corriente principal
- Elevación máxima y mínima en el segmento
- Pendiente promedio (calculada a partir de la longitud y la diferencia de elevaciones)
- Área drenada o de escurrimiento
- Información demográfica básica del área drenada
- Tiempo de concentración

En este sistema, a criterio del usuario, se define un coeficiente de escurrimiento (entre 0 y 1), se propone una tormenta en base a su precipitación (en mm) y su periodo de retorno (aunque este dato no parece influir en los resultados). A partir de estos datos, la herramienta calcula la

intensidad de la lluvia (mm/h) y el caudal pico (m<sup>3</sup>/s). Para sistematizar la información, se recomienda construir una tabla para registrar los valores de cada afluente seleccionado.

Para contrastar estos resultados otorgados por SIATL, se recomienda calcular los tiempos de concentración a partir de varios métodos racionales para determinar cuál es el más apropiado para las condiciones del territorio. Para este trabajo, se usó el modelo de Kirpich y la fórmula utilizada por la Dirección General de Carreteras de España. Una vez obtenidos los tiempos de concentración, la intensidad de lluvia y caudal pico son calculados empleando las fórmulas racionales generales.

Estos resultados cambiarán dinámicamente conforme a los valores de la tormenta de diseño y el coeficiente de escurrimiento dado. Inicialmente se usa un valor de 0.5 como coeficiente de escurrimiento pero este deberá ser calculado para cada área, donde el uso de suelo influye mucho y este debe ser actualizado ante el cambio de este (como es el caso con la creación de nuevos fraccionamientos). La tormenta de diseño se deberá escoger de acuerdo a los registros meteorológicos y con base en un periodo de retorno.

#### 7.1.4 Análisis diferencial del territorio

Esta herramienta pretende completar el panorama proporcionado a partir de los SIG, ayudar a identificar las limitaciones y vigencia de la información que se tiene y si es posible acercar al investigador a la realidad.

Esta herramienta combina la técnica de la observación indirecta con la observación directa. A partir de la información adquirida por la observación indirecta se pueden identificar áreas o puntos que podría resultar interesante observar de forma directa, sistematizando y enfocando esta observación.

Para efectos del presente trabajo, se cuenta con información descargada del sitio de INEGI como *shape* (base de datos geo-referenciada que puede ser agregada en un SIG como una capa), sobre las manzanas y sus características demográficas, así como mapas temáticos a escala 1:250000 de geología, edafología, hidrología. También se ha puesto a disposición de la presente investigación bases de datos más detalladas para la cuenca del Ahogado: relieves e hidrología, etc., que han sido generadas por profesores del ITESO.

Para contrastar esta información se revisaron las imágenes satelitales de Google Earth, la red hidrológica del SIATL, tres ediciones diferentes de los planes parciales de Tlajomulco de los últimos diez años incluyendo el más reciente y las observaciones realizadas en campo mediante el recorrido crítico mencionado anteriormente.

## 8. Desarrollo de la Investigación

Este trabajo propone la adopción de una estrategia mixta que permita a las microcuencas conservar un comportamiento hidrológico similar a su estado original con acciones a diferentes escalas: a nivel microcuenca, a nivel fraccionamiento/colonia/localidad y a nivel vivienda.

A escala de la microcuenca se definirán porciones de territorio que deberán mantenerse en su estado natural original de superficie tal que puedan compensar las áreas desarrolladas. Para este efecto se debe entender las condiciones del territorio que afectan el comportamiento hidrológico. Por tanto las áreas más convenientes para no desarrollar serán áreas naturales en estado original, zonas de recarga y de descarga, cuerpos de agua, humedales, las áreas más elevadas, las zonas con pendientes altas, los puntos más susceptibles a inundaciones, los terrenos con suelos altamente permeables, etc.

Además deberán existir áreas permeables repartidas por todo el territorio para reducir las superficies impermeables conectadas siguiendo un concepto fundamental de diseño de LID (Prince George, County of, 1999). Una forma de atacar este problema es mediante cotas verdes (se hablará de esta opción más adelante).

A una escala intermedia, es decir, barrios, vecindarios, fraccionamientos o localidades, los principios y criterios de diseño de Low Impact Development (LID) parecieran poder adaptarse de mejor forma a las condiciones locales que en otras escalas, ya que se pueden encontrar los espacios para introducir elementos de infraestructura verde (GI o SuDS) y hacer una planeación del sitio más detallada que a una escala mayor pero sin perder algunos rasgos hidrológicos del territorio.

En la escala de vivienda, considerando tanto la viabilidad económica como los tamaños de lote tipo de la región, se proponen estrategias en una lógica diferente para disminuir el impacto de la vivienda en su afectación al funcionamiento hidrológico ya que en muchos casos representan en conjunto una superficie impermeable conectada de grandes dimensiones.

A todas las escalas se contará con objetivos hidrológicos cuantificables que sirvan de referencia para la planeación y el diseño, de forma tal que se pueda evaluar si un esquema propuesto es aceptable o no en términos hidrológicos bajo criterios cuantificables y aplicables a una edificación o a un territorio que garanticen una capacidad determinada de almacenamiento, retención y/o infiltración. En el estado del Arte se hizo mención del criterio de la EPA para cumplir con las exigencias de la Sección 438 del Energy Independence and Security Act. Consiste en retener las lluvias del percentil 95 o menores bajo el supuesto de que representa la capacidad de infiltración de un terreno en condiciones previas al desarrollo.

El desarrollo de la investigación que se basa en la estrategia mixta que se acaba de mencionar se articula de la siguiente forma:

ACCIONES ESTRATÉGICAS		
ESCALA	URBANA	Organización del territorio Límites del crecimiento Zonificación Diagnóstico del funcionamiento hidrológico Densidad de la edificación Acciones prioritarias Políticas de implementación
	BARRIAL / VECINAL	Urbanización y diseño de fraccionamientos Infraestructura de drenaje pluvial
	VIVIENDA	Predios y edificación Ecotecnias

**Tabla 10.** Esquema explicativo del desarrollo de la investigación.  
Fuente: Elaboración propia.

La contribución a todas las escalas es indispensable para lograr buenos resultados. Bajo esta estrategia se buscará a todas las escalas conservar la configuración hidrológica natural, que evidentemente funciona y desarrollar de forma armónica alrededor de este.

## 8.1 Acciones estratégicas en la escala regional

### 8.1.1 Organización del territorio

#### *División política y distritos urbanos*

Tradicionalmente la organización del territorio se da con base en la división política. Los límites definidos de esta forma obedecen a criterios disímiles: algunos definidos por acentos o características geográficas (cumbres de montañas, curso de ríos, litorales, paralelos y meridianos, etc), otros por factores humanos (predios, carreteras, caminos y calles, zonas de influencia política o cultural, tratados, etc).

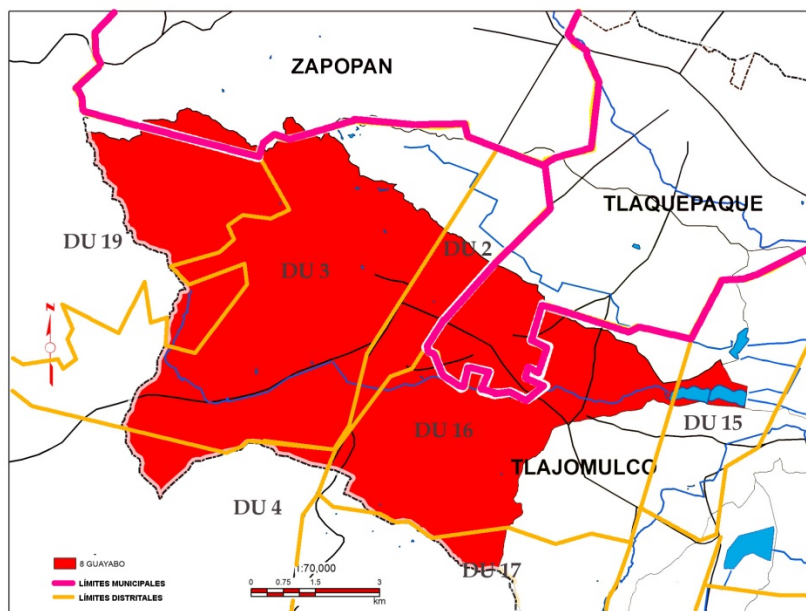
Para efectos de la planeación urbana, se divide la superficie municipal en distritos y sub-distritos urbanos. Estos límites obedecen de forma corriente a vialidades, preferentemente aquellas con



mayor jerarquía. En zonas no urbanizadas, ante la ausencia de vialidades, estos límites podrían estar dados por límites de predios o acentos geográficos. Tanto en la división municipal como en la subdivisión por distritos no se emplea un criterio unificado de delimitación que de coherencia al territorio como una unidad.

Como resultado, el funcionamiento del territorio resulta fragmentado o heterogéneo. Por tanto en una misma unidad territorial pudieran estar contenidas zonas sin ninguna relación entre sí, pertenecientes a la misma entidad territorial y al mismo tiempo zonas con dinámicas naturales compartidas con los territorios vecinos al grado de existir una relación causal o de dependencia, denotando la agrupación y fragmentación de sistemas de forma arbitraria. Bajo estas condiciones se pierde visibilidad de los impactos causados fuera del territorio de las acciones originadas dentro de este y viceversa.

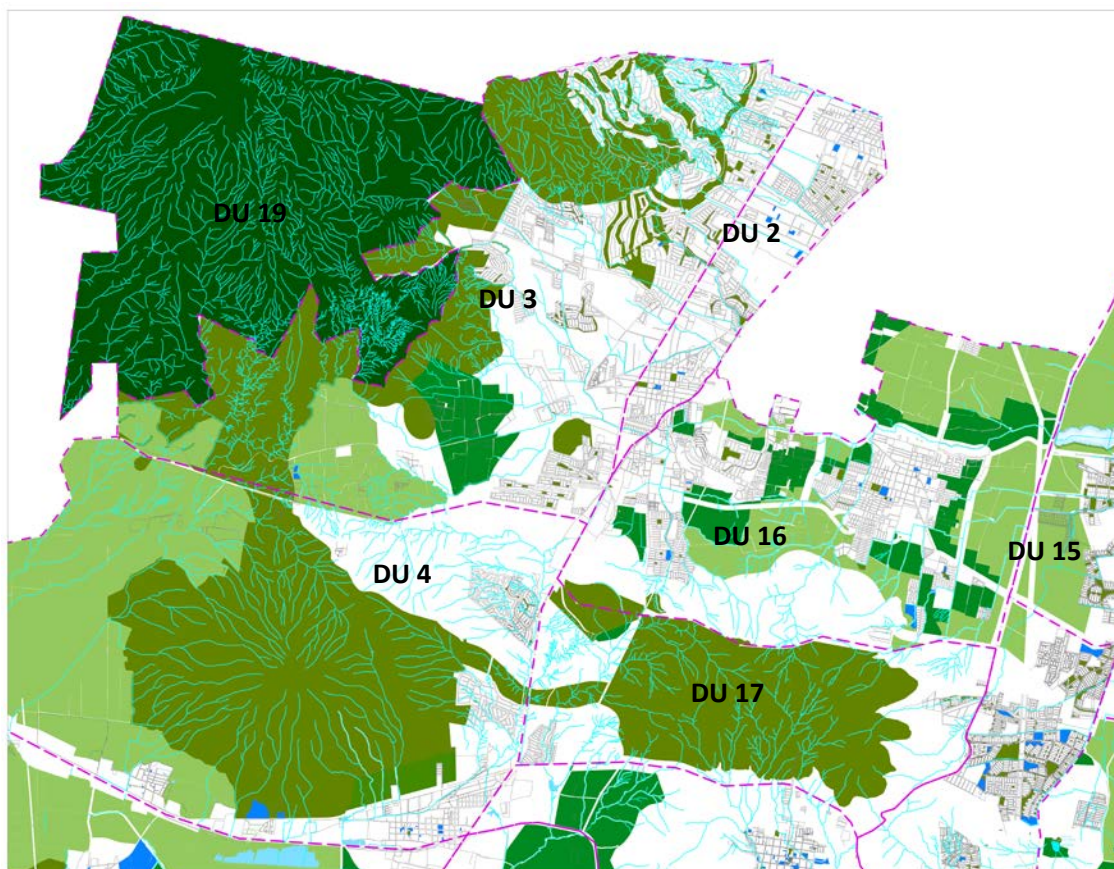
Esto sucede porque la división política no coincide con los sistemas y subsistemas primordiales del territorio. Para que el territorio quede organizado en sistemas y subsistemas completos, se requiere de un criterio uniforme de subdivisión que sea coherente con los sistemas que se pretende organizar.



**Figura 23.** Límites municipales y Distritos Urbanos de Tlajomulco en relación a la subcuenca del Guayabo.  
Fuente: elaboración propia.

La superficie de la subcuenca del Guayabo se encuentra fragmentada de acuerdo a la organización territorial vigente. En la figura 22 se contrasta la división municipal y distrital con los límites de la subcuenca. La mayor parte de la superficie se encuentra dentro del municipio de Tlajomulco, una fracción dentro del bosque de la Primavera pertenece a Zapopan y una sección central pertenece a Tlaquepaque. En la figura 23 se muestra la sección del Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Tlajomulco que está vinculada a la subcuenca. En cuanto a la división distrital, la subcuenca está

repartida entre 9 distritos urbanos, 7 de ellos de Tlajomulco, sin ninguna relación de estos límites con el comportamiento hidrológico del territorio. Más bien, estos están referidos cuando es posible a vialidades principales, como la Av. López Mateos, Camino Real a Colima, 8 de Julio, etc.



**Figura 24.** PMDU Tlajomulco, acercamiento al área de estudio con límites distritales.  
Fuente: (Tlajomulco de Zuñiga, Ayuntamiento de, 2010a)

Queda en evidencia que en la subcuenca del Guayabo los límites municipales y distritales no responden a una lógica hidrológica del territorio y por tanto se limita la capacidad de planeación integral en cuanto al recurso hídrico.

### *Organización del territorio en unidades hidrológicas*

Una forma alternativa de organización del territorio es a partir de cuencas hidrológicas. En una cuenca se conjuga de forma fluida la conformación geológica del territorio, y el movimiento del agua en este bajo la influencia inexorable del campo gravitacional terrestre. Al ser el agua un componente esencial para la vida, los ecosistemas estarán ligados al ciclo del agua y las consecuencias de este: escurrimientos determinados por el relieve, infiltración de acuerdo al

suelo, estructura geológica subterránea y el relieve, y evapotranspiración. Por tanto, una cuenca hidrológica pudiera contener sistema o subsistemas enteros.

“Las cuencas constituyen un sistema complejo, debido a que contienen una variedad de componentes, niveles jerárquicos, alta intensidad de interconexiones y no linealidades. Es un sistema dinámico, interrelacionado, gobernado por procesos de retroalimentación, autoorganizado, adaptativo y contraintuitivo, resistente a las políticas y dependiente de la historia.[...] Se forma así un tejido de interrelaciones entre diversas variables de tipo biofísico, socioeconómico, cultural y político” (Moreno Díaz, Alonso; Renner, Isabel, 2007).

Actualmente las cuencas hidrológicas son reconocidas en ámbitos internacionales como unidades esenciales para la planeación y manejo de recursos naturales; tal como ha sido corroborado varias veces en congresos internacionales tales como: Conferencia Internacional sobre el agua y el medio ambiente (Dublín, 1992); Agenda 21 de la Cumbre de la Tierra de las Naciones Unidas (1992); Conferencia Internacional sobre Agua y Desarrollo Sostenible (Francia, 1998); Conferencia Internacional sobre el agua dulce “El agua: una de las claves del desarrollo sostenible” (Alemania, 2001), etc. La complicación reside en la delimitación consensuada de estas (INEGI-INE-CONAGUA, 2007).

Una salida a esta dificultad es partir de unidades atómicas y después agrupar estas para conformar sistemas de mayor orden progresivamente. En coherencia con las objeciones hechas referentes a la división política y distrital, se propone que la unidad mínima de análisis y planeación contenga al menos un subsistema relevante completo para no perder su identidad. Se llamará microcuenca a esta división mínima.

Por tanto, para propósitos de este trabajo se define una microcuenca como una unidad de territorio con características plenas de cuenca, es decir, con parteaguas, ríos tributarios, vertiente principal y valle (Alatorre, Norberto, s.f.).

Esta delimitación tiene una relevancia que trasciende a la hidrología: “es en la microcuenca donde ocurren interacciones indivisibles entre los aspectos económicos (bienes y servicios producidos en su área), sociales (patrones de comportamiento de los usuarios directos e indirectos de los recursos de la cuenca) y ambientales (relacionados al comportamiento o reacción de los recursos naturales frente a los dos aspectos anteriores)”(Moreno Díaz, Alonso; Renner, Isabel, 2007).

“La microcuenca es el espacio donde ocurren las interacciones más fuertes entre el uso y manejo de los recursos naturales (acción antrópica) y el comportamiento de estos mismos recursos (acción del ambiente) basta una acción ligada al uso, manejo y degradación de tierras (vulnerabilidad) de una cierta envergadura, para que se suscite un impacto medible (riesgo) a corto o mediano plazo, sobre el suelo; el balance de biomasa y la cobertura vegetal; la cantidad y calidad del agua; la fauna, entre otras variables.” (Alatorre, Norberto, s.f.).

Con base en estos argumentos se justifica la organización del territorio en cuencas y subcuencas. Esta división permite con mayor facilidad gestionar los recursos hídricos y el crecimiento urbano con una visión integral. Evidentemente, este esquema de subdivisión pierde relevancia en territorios desérticos y grandes planicies.

No existe un acuerdo en la dimensión que una microcuenca debe tener. Villanueva recomienda que su tamaño sea entre 500 y 2000 ha (Alatorre, Norberto, s.f.). De acuerdo con un manual elaborado por la FAO de intervención en zonas rurales, en territorios accidentados administrados por instituciones con un nivel de desarrollo y capacidades de manejo limitadas, se sugiere una dimensión operativa de microcuenca máxima de 700 ha y 1000 familias, pero preferentemente entre 250 y 350 ha. Se admite, sin embargo que se puede llegar a trabajar con microcuencas de mayor extensión y densidad de población con ciertos ajustes: incrementando los recursos disponibles y/o subdividiendo la microcuenca en sectores tratando a las poblaciones como grupos complementarios y separados en el tiempo. Por otro lado, para microcuencas más pequeñas se sugiere atenderlas como una sola (FAO, s.f.).

Se observa que el tamaño asignado se define de acuerdo a características naturales del territorio tales como lo accidentado del relieve, los regímenes de lluvias y los escurrimientos superficiales permanentes, pero también al ámbito que se estudia, sea rural o urbano.

Se concluye entonces que las dimensiones se podrán determinar de forma que sean de utilidad práctica para la administración del territorio y que conserven un significado hidrológico. Por tanto, se ha de definir una dimensión de microcuenca que convenga a la realidad de la Zona Metropolitana de Guadalajara y los territorios vecinos susceptibles de ser urbanizados.

El reglamento de zonificación por su parte define las unidades territoriales en función de la cantidad de personas que residen en ese espacio (consultar la tabla a continuación) y en consecuencia se definen densidades de vivienda por zonas en los planes parciales como mecanismo de regulación.

Unidad vecinal	2500 - 5000 hab.	Máximo 10 hectáreas
Unidad barrial	10000 - 20000 hab.	Conformada por 4 o más unidades vecinales
Distrito urbano	75000 - 150000 hab.	Conformada por 4 o más unidades barriales

**Tabla 11.** Características básicas de las distintas categorías que integran un centro urbano de acuerdo al Reglamento Estatal de Zonificación de Jalisco  
Fuente: (Jalisco, Gobierno del Estado de, 2001).

Parte de la conveniencia de referirlo al tamaño de la población es que de esa forma resulta fácil determinar el equipamiento urbano e infraestructura requeridos por una población de ese tamaño.

Estas dimensiones no están en conflicto con la delimitación de una microcuenca. Para ligar la extensión superficial con la población se puede recurrir al concepto de límite de crecimiento que se explicará un poco más adelante. Se sugiere que la dimensión de microcuenca para los propósitos de este trabajo sea de 750 a 1500 hectáreas, lo cual representaría para la zona de estudio un límite de crecimiento aproximado en el rango de población definido para una unidad barrial. De igual forma, a los valores de 6000 y 12000 hectáreas corresponderían límites de crecimiento en el rango de un distrito urbano y que correspondería a la unidad de integración siguiente, que generalmente correspondería a la subcuenca.

### 8.1.2 Límites de crecimiento

Dividir el territorio en unidades hidrológicas permite determinar los recursos hídricos superficiales propios a cada territorio sin dependencias complejas. Este trabajo propone que para desarrollar un modelo de planeación sustentable, deben establecerse límites del crecimiento definidos por la disponibilidad de recursos de tal forma que su explotación no comprometiera su utilización en el futuro (Daly, Herman E., 1990).

Con base en lo anterior, una cuenca sólo podría soportar un consumo hídrico igual a la capacidad de captación de agua pluvial del territorio. En primer lugar se requiere determinar el volumen promedio anual de agua de lluvia que cae sobre la cuenca analizada. El volumen por tanto es resultado de multiplicar la superficie de la cuenca A, por la precipitación anual promedio (para lo cual hay que tener cuidado de hacer una correcta conversión de unidades):

$$\overline{V_{\text{anual}}} = A \cdot \overline{P_{\text{anual}}}$$

Posteriormente se tiene que determinar el volumen de agua que efectivamente puede ser aprovechada para consumo humano. Del total de agua de lluvia, una parte se evapora, otra se infiltra en el subsuelo y otra escurre.

El agua que escurre en condiciones originales del terreno, se puede aprovechar para su consumo si esta no alcanza a entrar en contacto con agentes contaminantes, por lo que el punto de captura deberá estar cercano al origen del escurrimiento y en áreas controladas.

El agua de arroyos que en su carrera inicial no son perturbados por la actividad humana puede ser aprovechada pero habrá que seguir un procedimiento de filtrado de los materiales acarreados antes de poder ser mezclada con el resto del agua.



De igual forma, parte del agua que se retiene en el subsuelo puede ser dirigida a cisternas para su almacenamiento, siempre y cuando no interfiera con la meta de recarga.

Para definir la proporción de agua que será aprovechada con respecto al agua que se infiltra y la que escurre, este trabajo propone tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Habría que permitir que el suelo mantuviera sus procesos naturales, por tanto, sólo tomar el agua de lluvia que este no puede retener y que escurre.
- De igual forma, no debe comprometerse la existencia íntegra de los cuerpos de agua naturales. Se deben entender los ciclos biológicos y la biodiversidad que se sostiene. Por ejemplo, en el caso del Arroyo El Guayabo, a pesar de estar contaminado, su cauce es hábitat para garzas, peces y vegetación hidrófila, por citar los más evidentes.
- Debe establecerse una proporción de superficie construida con respecto al territorio que garantice la recarga de los acuíferos y la salud del suelo. La superficie con cubierta vegetal es relevante en cuanto su papel para cerrar el ciclo al devolver el agua a la atmósfera y mantener condiciones adecuadas para favorecer las precipitaciones en la región.
- También se debe considerar el efecto causado a las cuencas vecinas (muy probablemente este sea más relevante para aquellas que se encuentran cauce abajo) y a la región. En caso de conflicto estos límites tendrían que ser redefinidos como resultado de una negociación o gestión integral de los recursos hídricos entre los territorios involucrados.

Ya que se conoce el volumen que se puede aprovechar al año, se sustraen las pérdidas (que podrían ser por evaporación o fugas). Para obtener la cantidad de agua disponible diaria, se divide entre los días del periodo (365.25). Se establecen cuotas de agua por uso en términos de porcentaje: habitacional, comercial, industrial, equipamiento, etc. Estas cuotas no deberán excederse por lo que constituyen un límite de desarrollo.

Para el caso habitacional, se deberá asignar una dotación realista por habitante que será efectiva en la práctica. El límite de población resultará entonces de dividir la cuota diaria destinada a uso habitacional entre la dotación diaria de agua. Esto derivará en el límite de viviendas posibles, dividiendo el valor límite de población entre el valor promedio regional de habitantes por vivienda. En contextos donde la reutilización de agua haya permeado los usos de la sociedad, sólo se requeriría proporcionar agua para abastecer al sistema inicialmente y reponer las pérdidas. Esto permitiría aumentar la capacidad del territorio para el sostenimiento de la actividad humana en términos hidrológicos siempre y cuando se respeten las consideraciones expuestas anteriormente.

Para los otros usos, se debe entender el consumo particular de la actividad a establecer. No es igual la demanda de un hotel a un restaurante, o a un edificio de oficinas o a una fábrica textil y estos dentro de sus géneros variarían en escala y tipo. De esta forma se tendrán que limitar las licencias a la cantidad de agua disponible.



### **Límites de crecimiento de la subcuenca del Guayabo**

Tomando en consideración los criterios anteriormente expuestos, su aplicación en la subcuenca del Guayabo arroja lo siguiente:

La superficie de la subcuenca es de 76.7 km<sup>2</sup> y la precipitación anual media estimada para el municipio de Tlajomulco de 883.5 mm. El volumen promedio de agua de lluvia que caería en un año sobre El Guayabo es de 67.764 millones de metros cúbicos.

De alcanzar un 10% de aprovechamiento de este volumen, el volumen almacenado sería de 6.776 millones de metros cúbicos. Las capacidades de las presas que se encontraban en la desembocadura de la subcuenca eran similares: 1.8 millones m<sup>3</sup> cada una, para lo cual la Presa del Guayabo utilizaba una superficie de 25.05 ha y la Presa El Molino 29.38 ha por lo que estando al límite de su capacidad contendrían 5.3% del volumen de lluvias, prácticamente la mitad del objetivo propuesto para su aprovechamiento.

Ahora habría que fijar una dotación máxima diaria para la población que resida dentro de los límites de la subcuenca. Con una dotación diaria por habitante de 200 litros, el volumen almacenado alcanzaría para abastecer en promedio a 92,764 habitantes. Bajo estas consideraciones, ya en el 2010 el límite de El Guayabo había sido excedido (97,185 habitantes). En los cinco años siguientes han aparecido nuevos desarrollos habitacionales, lo que permiten suponer que el número de habitantes ha seguido creciendo. El agua disponible por habitante ya sería de 185 litros diarios de ser 100,000 personas, o de 154 litros diarios con 120,000 habitantes, lo cual pudiera ser aceptable si se toma el caso de Monterrey, mencionado en Antecedentes.

### **8.1.3 Zonificación**

Primero se discuten modelos alternativos de zonificación y su eficacia para resolver los problemas de naturaleza hidrológica del territorio.

Posteriormente se discute la clasificación de zonas y áreas, ya que para hacer posible la implementación de estrategias propuestas en este trabajo conviene reservar espacios dentro del territorio cuya utilización quede restringida a otros usos. Entre las áreas que se requieren para tal fin se encuentran: áreas de protección hidrológica, zonas de regulación de la escorrentía, zonas de almacenamiento, zonas de tratamiento y zonas de riesgo.

#### **8.1.3.1 Alternativas de zonificación**

Ya se ha argumentado que el modelo de zonificación actual fue concebido bajo una lógica en la cual, la hidrología del territorio formaba en el mejor de los casos una condicionante secundaria y los temas de aprovechamiento de agua pluvial y escorrentía mínima lo rebasan. Por tanto se hace primero una revisión de posibles opciones de acción, resumidas en la siguiente tabla.

Alternativas de zonificación	Funciones generadas
Sobreposición al Distrito	Se utiliza la zonificación existente y se definen regulaciones adicionales
Zonificación por desempeño	Zonificación flexible basada en objetivos del sitio enfocados en la preservación de la función hidrológica
Zonificación por incentivo	Otorga incentivos a los actores que se comprometen y cumplen con las restricciones. Permite mayor flexibilidad para lograr la protección ambiental
Sobreposición de áreas impermeables	Opciones de configuración de zonas se basan en los límites de impermeabilidad del sitio
Zonificación de remediación <sup>1</sup>	Se utiliza una combinación de las opciones anteriores para restablecer en la medida de lo posible el funcionamiento hidrológico del lugar. Recomendado para territorios urbanizados en más de un 80%.
Zonificación basada en cuencas <sup>2</sup>	En lugar de distritos con límites arbitrarios, se definen microcuencas como unidades de planeación territorial. Se antepone el funcionamiento hidrológico básico de la microcuenca a otro tipo de lógicas. Las áreas de protección se definen a priori. Se utilizan principios de la zonificación por desempeño, zonificación por incentivo y sobreposición de áreas impermeables.

**Tabla 12.** Alternativas de zonificación al modelo dominante.

Fuente: Elaboración propia a partir de tabla 2-3 en Low Impact Development Design Strategies (Prince George, County of, 1999).

De las alternativas presentadas, la llamada “Sobreposición al Distrito” se considera de corto alcance. Tanto la “Zonificación por desempeño”, “Zonificación por incentivo” y “Sobreposición de áreas impermeables” presentan estrategias que podrían incrementar la eficiencia de la “Sobreposición al Distrito”, pero se considera que funcionan más como medidas correctivas. Tal es el caso de la “Zonificación de remediación” que las retoma. Posiblemente sea la opción más

<sup>1</sup> En el documento original, “Watershed based zoning” corresponde a lo que en este documento refiere como zonificación de remediación. Leer la siguiente nota al pie.

<sup>2</sup> Aunque “Zonificación basada en cuencas” se puede traducir como “Watershed based zoning”, el texto actual se distancia de la referencia original. Se considera que lo propuesto por el presente texto corresponde en mayor medida al término. La descripción de las funciones generadas por tanto es totalmente original.

indicada en territorios altamente desarrollados. Una vez restablecido el funcionamiento hidrológico se puede adoptar el modelo de “Zonificación basada en Cuencas”.

Pero cuando existe margen de acción en el territorio, el modelo a adoptar debería ser la “Zonificación basada en cuencas”. Bajo este esquema, en lugar de distritos con límites arbitrarios, se definen microcuencas como unidades de planeación territorial. Se antepone el funcionamiento hidrológico básico de la microcuenca a otro tipo de lógicas. Las áreas de protección se definen a priori. Se utilizan principios de la zonificación por desempeño, zonificación por incentivo y sobreposición de áreas impermeables.

#### *8.1.3.2 Áreas existentes relacionadas al recurso hídrico*

El Reglamento de Zonificación del Estado de Jalisco define las siguientes áreas de protección relacionadas con la hidrología del territorio:

- a) Áreas de Protección a Cauces y Cuerpos de Agua”
- b) “Áreas de Protección a Acuíferos”

A continuación se discute la definición de estas y se introducen adecuaciones para que estas áreas respondan a los propósitos de la estrategia propuesta por este trabajo.

**Áreas de Protección a Cauces y Cuerpos de Agua (CA).** Este concepto existe en el Reglamento de Zonificación, que lo define como “las requeridas para la regulación y el control de los cauces en los escurrimientos y vasos hidráulicos tanto para su operación natural, como para los fines de explotación agropecuaria como de suministro a los asentamientos humanos” (Jalisco, Gobierno del Estado de, 2001). Estas comprenden cuerpos de agua, cauces de corriente continua y escurrimientos, en los términos de la Ley de Aguas Nacionales. Para definir estas áreas, el municipio deberá solicitar a CONAGUA un dictamen al respecto. Son propiedad federal y están sujetas a la Ley Federal de Aguas y la LGEEPA.

Conviene entender lo que la Ley considera como cauce: “El canal natural o artificial que tiene la capacidad necesaria para que las aguas de la creciente máxima ordinaria escurran sin derramarse. Cuando las corrientes estén sujetas a desbordamiento, se considera como cauce el canal natural, mientras no se construyan obras de encauzamiento; en los orígenes de cualquier corriente, se considera como cauce propiamente definido, cuando el escurrimiento se concentre hacia una depresión topográfica y éste forme una cárcava o canal, como resultado de la acción del agua fluyendo sobre el terreno. Para fines de aplicación de la presente Ley, la magnitud de dicha cárcava o cauce incipiente deberá ser de cuando menos de 2.0 metros de ancho por 0.75 metros de profundidad” (DOF, 2013).

De igual forma, la delimitación de ribera o zona federal se define: “Las fajas de diez metros de anchura contiguas al cauce de las corrientes o al vaso de los depósitos de propiedad nacional, medidas horizontalmente a partir del nivel de aguas máximas ordinarias. La amplitud de la ribera o

zona federal será de cinco metros en los cauces con una anchura no mayor de cinco metros. El nivel de aguas máximas ordinarias se calculará a partir de la creciente máxima ordinaria que será determinada por "la Comisión" o por el Organismo de Cuenca que corresponda, conforme a sus respectivas competencias, de acuerdo con lo dispuesto en los reglamentos de esta Ley. En los ríos, estas fajas se delimitarán a partir de cien metros río arriba, contados desde la desembocadura de éstos en el mar. En los cauces con anchura no mayor de cinco metros, el nivel de aguas máximas ordinarias se calculará a partir de la media de los gastos máximos anuales producidos durante diez años consecutivos" (DOF, 2013).

De acuerdo con la definición operativa de flujo volumétrico, caudal o gasto, es la cantidad de agua que pasa a través de una sección y se puede obtener conociendo el área hidráulica  $A$  de la sección y la velocidad media  $v$  de la corriente:

$$Q = vA$$

De no existir aportaciones o extracciones de agua, para un cauce, el caudal debiera permanecer constante en diferentes puntos:

$$Q_1 = Q_2 = v_1 A_1 = v_2 A_2$$

Por tanto, cuando la velocidad media es mayor, la sección del cauce es menor. Cuando la velocidad de la corriente disminuye, el cauce es más amplio.

Tomando en cuenta este fenómeno, la Ley protege únicamente los cauces a partir del punto en que alcanzan la sección mínima. Con el fin de evitar la contaminación de los cauces aguas arriba, el presente trabajo propone ampliar el criterio.

Por otro lado, debe considerarse que de acuerdo con el Artículo 116 de la Ley de Aguas Nacionales(DOF, 2013), todos aquellos terrenos ganados por medios artificiales al encauzar corrientes o desecar vasos de agua de propiedad nacional, pasarán de forma automática a ser propiedad de la nación. Sin embargo para hacer efectiva esta disposición ha hecho falta capacidad de vigilancia y voluntad política. Los cauces y vasos de agua bajo una perspectiva de gestión integrada del recurso hídrico serían considerados activos preciados de interés público, vigilados por las instituciones y la ciudadanía.

Además se introduce una restricción adicional: las áreas inter-cauces, cuando la distancia entre dos o más zonas federales sea menor a 35m no se podrá construir edificaciones de uso habitacional, comercial o industrial. Esto tiene por objeto, contar con una zona de amortiguamiento en la confluencia de dos cauces ante posibles crecidas. Es una zona vulnerable a erosión, por lo que la presencia de árboles podría ayudar a retener el suelo. Por otro lado, el suelo de esta área tendrá un elevado nivel de humedad lo cual no es adecuado para edificar.

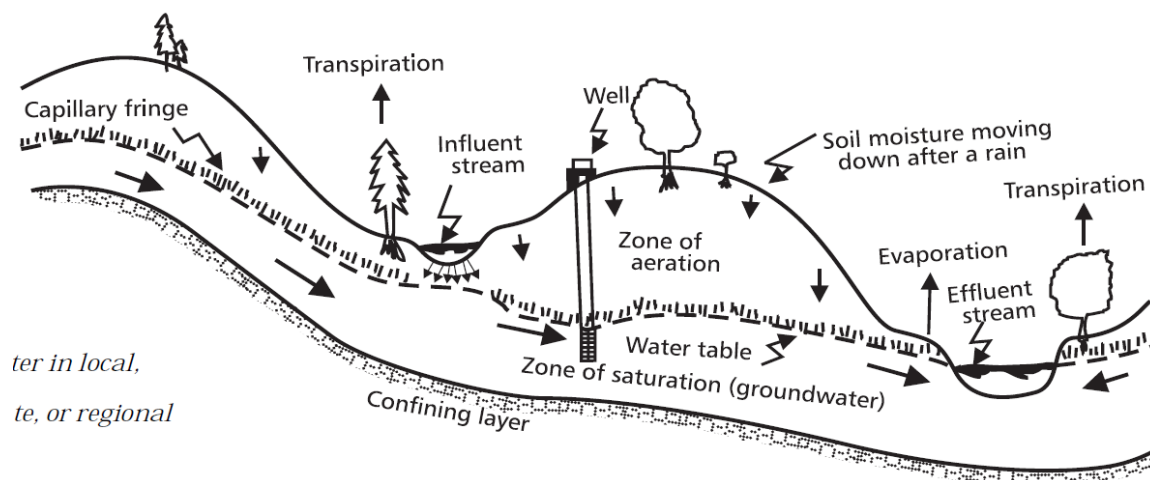
**Áreas de Protección a Acuíferos (AP).** Para el Reglamento Estatal, las áreas de protección a acuíferos se definen como "las requeridas para la conservación y el mejoramiento de los mantos

freáticos, incluyendo las obras de infiltración para la recarga acuífera ” (Jalisco, Gobierno del Estado de, 2001). Se subdivide en áreas directas de protección al acuífero (manantiales y fuentes de extracción), áreas inmediatas de protección al acuífero (zona de amortiguamiento) y área general de protección al acuífero (zonas de recarga de acuíferos). El dictamen como en el anterior es provisto por CONAGUA a instancias de la autoridad municipal.

Se identifica sin embargo debilidades en el reglamento: Mientras que las zonas de descarga están restringidas de cualquier otro uso (lo cual es positivo), en las zonas de recarga se restringen únicamente edificaciones que no cuenten con drenaje canalizado, usos con alta densidad e instalaciones que manejen sustancias que puedan contaminar el subsuelo. El nivel de restricción debiera ser similar al primero. De igual forma, sólo existen zonas de amortiguamiento para las áreas de descarga cuando las áreas de recarga también lo requieren.

Se propone predefinir las zonas de recarga y descarga a priori que posteriormente sean corroborados mediante estudios de campo con base en la solución analítica a la ecuación de Laplace para el flujo de agua subterráneo encontrada por Tóth para un terreno ondulante, el relieve genera ondulaciones en el nivel freático, por tanto para un sistema local de agua subterránea, las áreas de recarga se situaran en los puntos altos y las áreas de descarga en un valle topográficamente adyacente. Los sistemas regionales por su parte tienen su área de recarga en el parteaguas y la zona de descarga en el punto más bajo. También se observó que conforme más pronunciado fuera el relieve, mayor será la profundidad a la que los sistemas locales se extenderán (Fetter, C. W., 2001).

En cuanto a la calidad del agua, aquella que pertenece a un flujo regional tendrá una mineralización relativamente alta ya que se desplazará lentamente por circuitos profundos. Por esta misma razón, su temperatura será mayor (el gradiente geotérmico es de alrededor de 2.5°C por cada 100m de profundidad). Los sistemas locales en cambio son someros con circuitos cortos. El tamaño del área de recarga es mucho mayor con respecto al volumen almacenado en el acuífero. Por esta razón el agua queda expuesta por menor tiempo con las rocas y se espera que tenga un menor grado de mineralización. Su temperatura en su punto de descarga será cercana a la temperatura ambiente. Por su velocidad, los sistemas locales además muestran una mayor correlación con el ciclo hidrológico, por lo que mostrará fluctuación en cantidad y calidad (Fetter, C. W., 2001).



**Figura 25.** Flujo de agua subterránea y sistemas locales, intermedios y regionales  
Fuente: (Prince George, County of, 1999)

En zonas extensas donde el nivel freático es regular no existen sistemas de flujo subterráneo. La evapotranspiración se vuelve el único método de descarga. En estas condiciones, el agua subterránea estará altamente mineralizada.

Ahora bien, hay que distinguir entre las áreas protegidas de recarga de acuíferos y las zonas de infiltración en las áreas urbanizadas. Las primeras son protegidas para garantizar la calidad de agua y una tasa mínima de recarga de los sistemas de acuíferos intermedios y regionales, por lo que otros usos se restringen totalmente; mientras que las segundas, tienen el propósito de reducir los escurrimientos y mantener la hidrología del territorio. En estas zonas se tendrán que cumplir los objetivos hidrológicos y está permitida la construcción.

### 8.1.3.3 Áreas y zonas propuestas

Este trabajo propone nuevas áreas a ser incluidas en el Reglamento de Zonificación: a) “Zonas de riesgo” y b) “Zonas para el manejo de aguas pluviales”.

#### Zonas de riesgo

Para efectos del presente trabajo, se consideran zonas de riesgo para la población aquellas en las que ante un evento pluvial (o la sucesión de varios) la población se expone a que sus viviendas se inunden, a quedar incomunicados al colapsarse las vialidades u otros daños materiales. Las zonas bajas y planas son susceptibles a ser inundadas. Alrededor de los cauces los arroyos podrían



desbordarse y arrastrar objetos consigo. Incluso el agua podría cambiar de curso y hacerse camino.

a) Zonas de riesgo por inundación

Se consideraran zonas de riesgo las zonas que son susceptibles a inundarse a un grado tal que se causen daños a los habitantes, sus bienes o a la infraestructura urbana independientemente de la causa.

Estos puntos pueden identificarse por varios métodos, complementarios entre sí:

- Mapeo de todos los registros históricos de eventos de esta naturaleza.
- Identificación de puntos más bajos, zonas de estancamiento o acumulación natural de agua mediante métodos geo-hidrológicos
- Calculo de láminas de agua en las avenidas máximas más significativas (cauces principales bajo eventos extremos) con periodos de retorno de 25 años mínimo.
- Mapeo del perímetro de humedales y pantanos (existentes o desecados).
- Detección de puntos posibles de conflicto por la interposición de obstáculos por acción humana a cauces permanentes, vertientes de escurrimientos y cuerpos de agua.
- Identificación de conflictos creados al canalizar la esorrentía por infraestructura de menor capacidad.

A partir de los primeros 4 métodos se podrá generar un polígono de tratamiento especial, restringido a la edificación y con lineamientos especiales a la infraestructura. En el caso de humedales, estos deberán conservarse en su estado original. En otros casos, se pueden utilizar como áreas verdes aunque se recomienda introducir elementos que ayuden a mejorar la retención e infiltración natural, tales como pozos y zanjas de infiltración (*Soakaways & Infiltration Trenches*), cunetas verdes (*Swales*), depósitos de detención (*Detention Basins*) y estanques de retención (*Retention Ponds*).

Para los dos últimos se deben corregir las intervenciones. En el primer caso, lo más deseable es eliminar los obstáculos, modificar la infraestructura para que no interfiera en el curso del agua. En el segundo se puede tratar de disminuir el problema reduciendo los escurrimientos aguas arriba mediante métodos de infiltración pero el área de la sección del canal deberá ser ajustada.

b) Zonas de riesgo por arrastre o desbordamiento

La velocidad de la corriente de agua es proporcional a la pendiente del cauce. Mientras mayor es su velocidad, mayor es su capacidad para erosionar y arrastrar. Con base en los criterios presentados en el estado del arte, se puede definir una velocidad mayor a 1.5 m/s como riesgosa para un peatón. De igual forma, se menciona que el producto del calado por la velocidad, por simplicidad  $vy$ , puede ser un criterio relevante de riesgo y que el límite debiera ubicarse entre 0.5 y 1.

Por otro lado, si se recuerda la definición de caudal este es la cantidad de agua que cruza por una sección en un lapso de tiempo definido:

$$Q = vA$$

La sección A, está relacionada con el calado (h) y la longitud transversal del cauce(w). Aunque esta varía de acuerdo a la geometría, el área de la sección rara vez sería mayor al producto de ambas (como si la sección fuera rectangular).

$$A \leq h \cdot w$$

Asumiendo el peor caso, se podría relacionar el caudal con el calado y la velocidad con la siguiente ecuación:

$$Q \leq v \cdot h \cdot w = vy \cdot w$$

Por tanto al conocer la longitud transversal de un cauce y utilizando los parámetros anteriores se podría definir rangos para el caudal pico. Por tanto, para una longitud transversal de 5 m, asumiendo el criterio  $v_y$  de 0.5 como riesgo medio y de 1 como riesgo alto con base en lo encontrado en el estado del arte, un caudal pico mayor a 2.5 m<sup>3</sup>/s comienza a ser de riesgo medio y a partir de los 5 m<sup>3</sup>/s sería alto.

El tiempo de concentración también resulta relevante ya que si un evento pluvial tiene una duración superior al tiempo de concentración, el caudal pico no disminuirá hasta que la lluvia ceda. Además resulta en el tiempo disponible para actuar ante un evento imprevisto. Sin embargo, por sí sola no es un indicador de riesgo si no va acompañada de un caudal de consideración.

### Áreas para el manejo de agua pluvial

Estas áreas están consideradas para realizar funciones tales como infiltración, conducción, tratamiento y almacenamiento, mediante métodos de bajo impacto.

Se aborda la captación y almacenamiento de agua de lluvia a esta escala debido a que tanto el régimen de lluvia local con lluvias concentradas en verano (consultar el Anexo 1) como las dimensiones de los predios no favorecen a la consecución de los objetivos hidrológicos en la escala de vivienda ni a la autonomía hídrica de las viviendas

Las ubicaciones de estos elementos se definirán con base en características propias del terreno que los hagan apropiados para cierto fin. Para el almacenamiento de agua pluvial, las características ideales serían proximidad al cauce de suministro, suelo impermeable, confinamiento natural por el relieve, etc. Para las zonas de infiltración, evidentemente las características del suelo, pero también que el flujo de escorrentía que pase a través sea suficiente.

Finalmente, las áreas de tratamiento deberán permitir un flujo lento mediante pendientes ligeras y evitar la contaminación del subsuelo por lo que es preferible que estos sean impermeables.

#### *8.1.3.4 Clasificación de zonas por propiedades hidrológicas*

Esta zonificación se superpone a la clasificación de áreas por vocacionamiento y usos de suelo para otorgar propiedades adicionales al territorio relativas al manejo de agua pluvial tales como los objetivos hidrológicos particulares o restricciones a la extracción de agua subterránea.

##### **Clasificación de áreas por objetivos hidrológicos**

De acuerdo a las particularidades de una zona en particular, tales como suelo y pendientes del terreno, se pueden definir diferentes objetivos de infiltración y captación. Por tanto la clasificación de áreas por objetivos hidrológicos resultaría en un mapa donde se agruparan las superficies con objetivos hidrológicos comunes.

La configuración seleccionada de estas zonas deberá ser tal que se cumplan con los objetivos hidrológicos de la microcuenca como un todo. Para comprobar que esto es así, se deberá realizar un análisis del funcionamiento hidrológico considerando la permeabilidad resultante de acuerdo al uso del suelo y la densidad de la edificación. Este método se expondrá con mayor detalle más adelante.

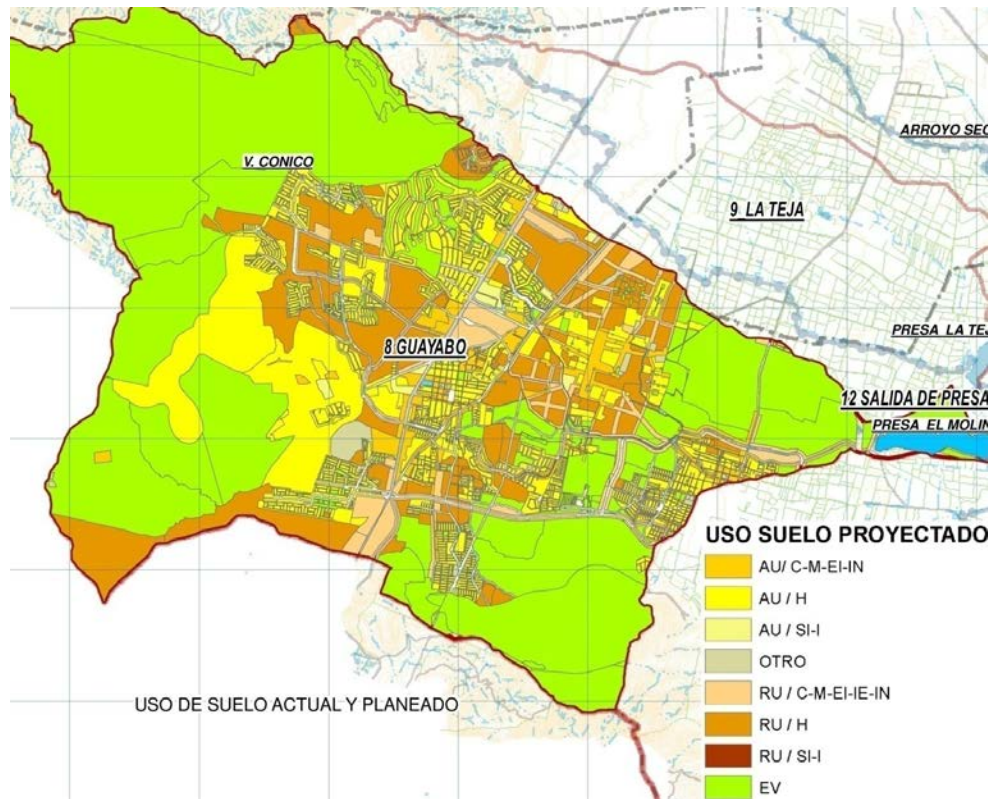
##### **Clasificación de áreas por uso de agua subterránea**

De igual manera que la clasificación anterior, es independiente a las demás y puede superponerse. Estas se clasificarán por el nivel de extracción permitido o si esta queda restringida.

Con el fin de recuperar los acuíferos existentes e impulsar el aprovechamiento de agua pluvial se pueden definir zonas de veda a la explotación de agua subterránea. De acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales en su artículo 18 (DOF, 2013), es posible suspender los permisos de explotación de los acuíferos que estén en condiciones de sobreexplotación.

#### *8.1.3.5 Zonificación en el Guayabo*

En la figura siguiente se puede observar con respecto a los planes parciales las perspectivas de crecimiento que se tenían en el 2010 (clave RU) de las cuales ya se han materializado la mayoría, por lo que parte de las áreas protegidas (EV) se han transformado en reservas urbanas. En el “Anexo 2. Progresión de la expansión urbana” se puede consultar información adicional sobre esta expansión.

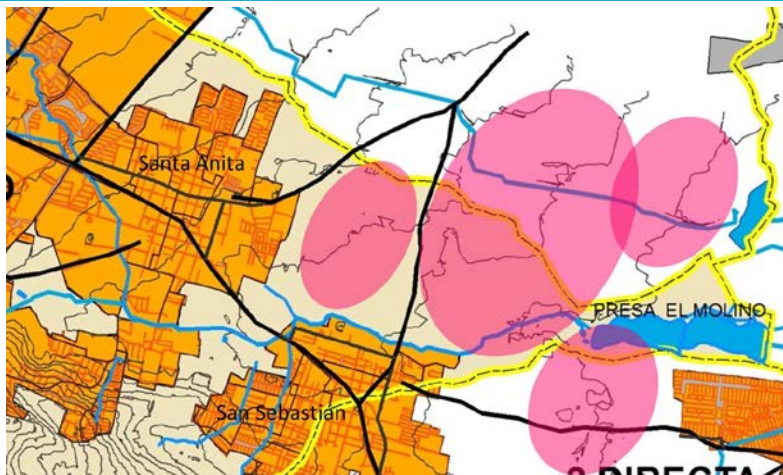


**Figura 26.** Uso de suelo oficial de acuerdo con planes parciales de Tlajomulco, Zapopan y Tlaquepaque.  
Fuente: (CEA, 2010)

Por tanto y con base en los conceptos que se introdujeron al principio de esta sección (8.1.2.2 Zonificación), se elabora una nueva zonificación, para lo cual se dispone de las reservas urbanas y predios de uso agropecuario. A continuación se presentan los diferentes análisis que sirvieron de base para generar la zonificación y posteriormente la nueva zonificación.

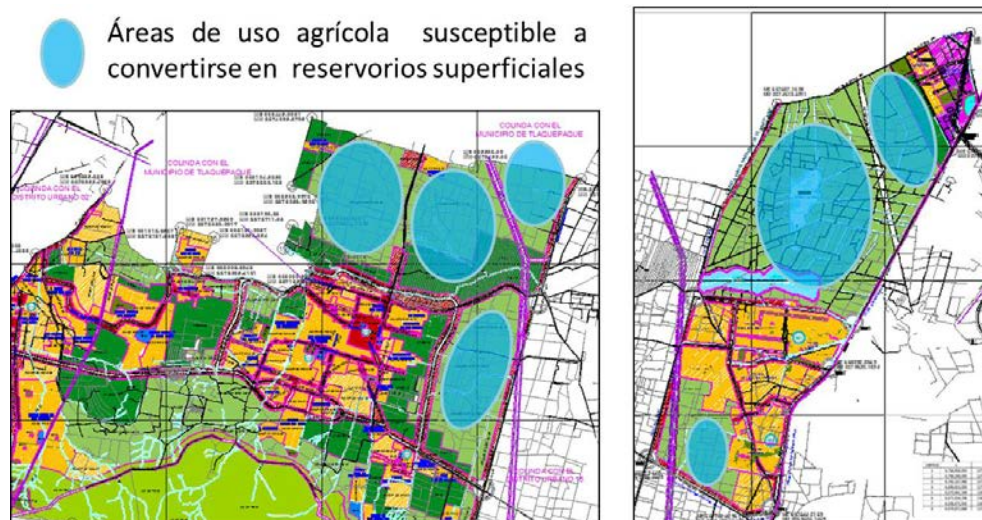
#### **Zonas con potencial para almacenamiento de agua pluvial**

Las áreas con mayor potencial de almacenamiento superficial son aquellas áreas sin urbanizar, que presentan una pendiente menor al 5% y que se encuentren cerca del cauce principal. Las áreas que cumplen con estas características se encuentran al final de la subcuenca, alrededor de las presas del Guayabo, el Molino y la Teja. Por otro lado, presentan mayor riesgo de contaminación al haber pasado el agua por San Agustín, Santa Anita y San Sebastián.



**Figura 27.** Zonas con potencial para almacenamiento de agua pluvial en la parte baja de la subcuenca.  
Fuente: elaboración propia.

Las áreas señaladas en la figura 33 fueron corroboradas contra los planes parciales vigentes en la figura 34, identificando el uso de suelo actual y el plan de desarrollo a corto y mediano plazo. Los planes parciales consultados fueron los correspondientes al distrito urbano 16 “San Sebastián el Grande” y a la derecha del distrito urbano 15 “8 de julio”.

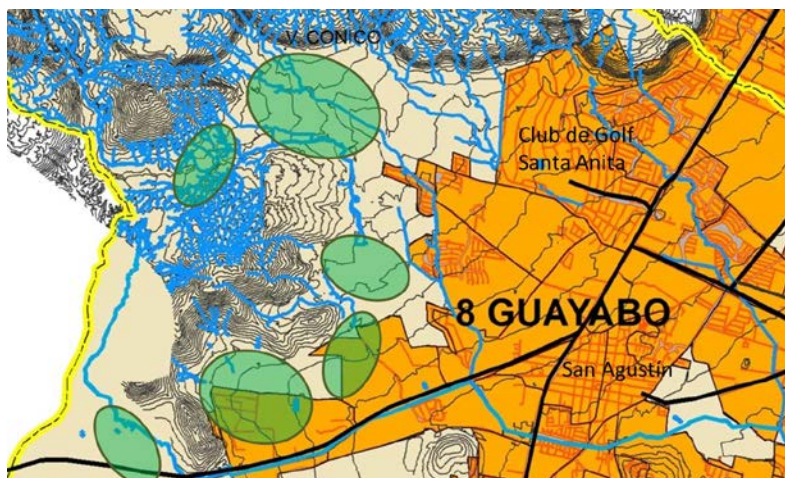


**Figura 28.** Revisión de Planes Parciales de Tlajomulco para definir con mayor precisión las áreas de uso agrícola susceptibles a convertirse en reservorios en la parte baja de la subcuenca.  
Fuente: elaboración propia.

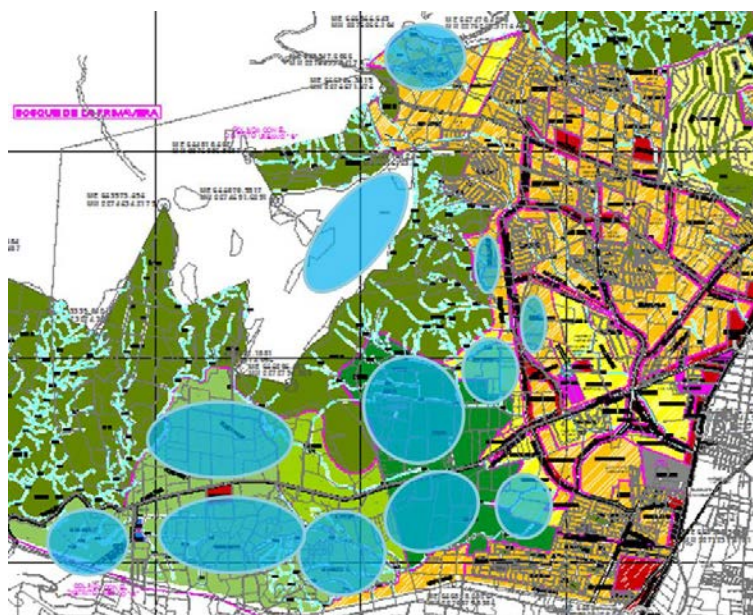
En general los planes parciales son compatibles con la creación de reservorios, siendo los usos de suelo principalmente agrícolas o áreas verdes (ver la figura anterior). Las áreas aprovechables se estiman entre 5 y 8 km<sup>2</sup>.



Finalmente, se considera conveniente reservar áreas para infiltración o almacenamiento superficial que estén a las faldas de los cerros, donde aún no ha sido contaminada y el flujo lleva mayor velocidad, mitigando así problemas aguas abajo. El único problema es que está en contraposición directa con los intereses inmobiliarios de la zona (ver figuras 35 y 36).



**Figura 29.** Zonas consideradas ideales para la infiltración en la parte alta de la subcuenca del Guayabo.  
Fuente: elaboración propia

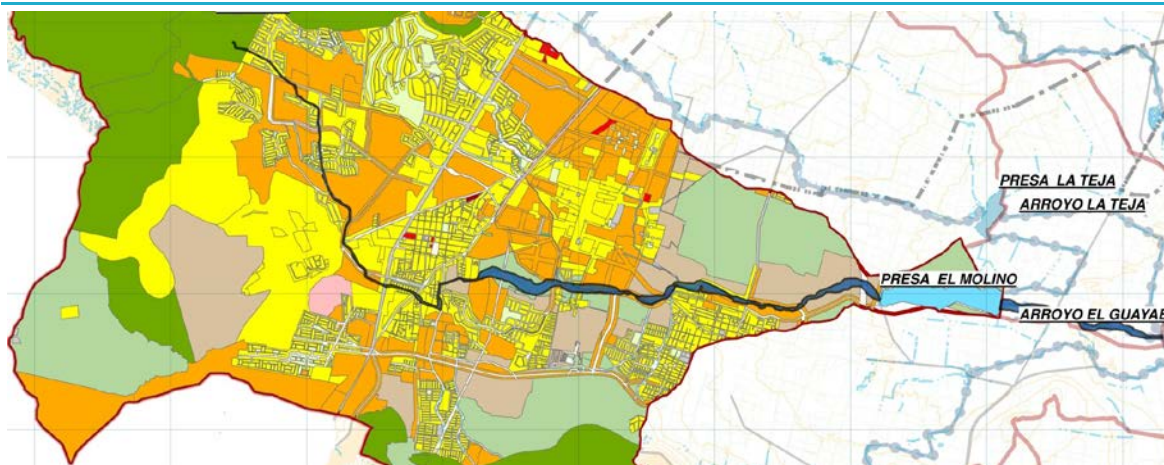


**Figura 30.** Zonas potenciales de infiltración considerando el plan parcial vigente.  
Fuente: elaboración propia

### Identificación de zonas de riesgo

Las zonas de riesgo por inundación fueron definidas tomando los puntos más bajos de la cuenca y las láminas de agua de los últimos 25 años (ver imagen siguiente).





**Figura 31.** Lámina de agua con periodo de retorno de 25 años.

Fuente: (CEA, 2010)

La identificación de riesgos por desbordamiento y arrastre requieren de una caracterización minuciosa de la red completa de afluentes de la subcuenca. El presente trabajo hace el análisis correspondiente al arroyo de la Culebra.

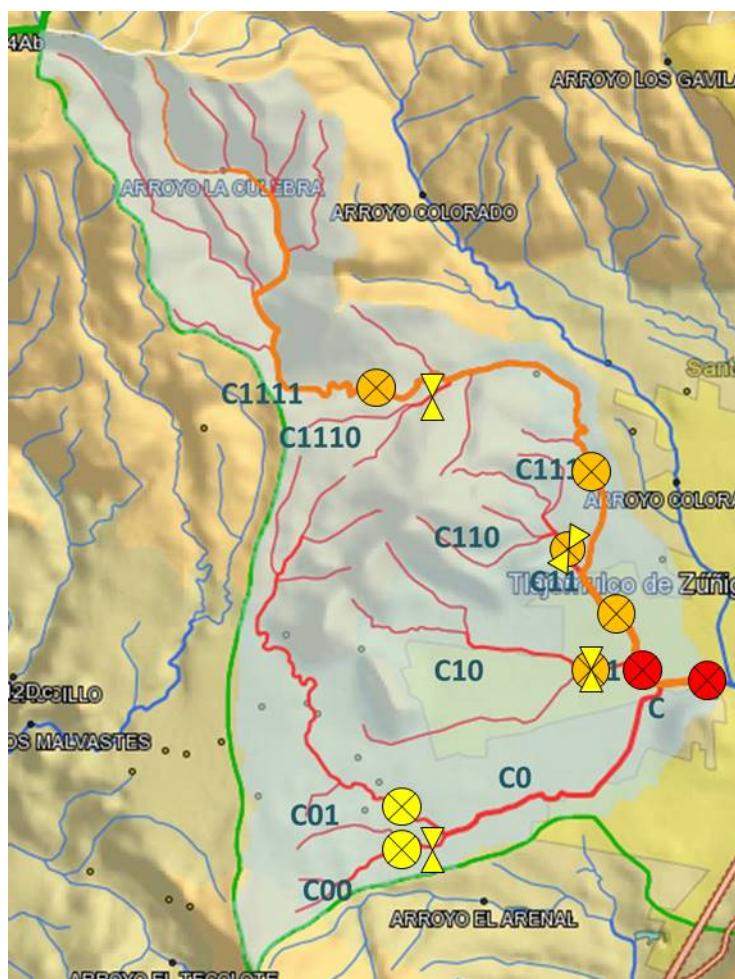
En un primer paso se calculan los tiempos de concentración y caudales pico de todos los diferentes segmentos que componen un afluente. Estos valores estarán asociados a una tormenta de diseño definida en relación a un periodo de retorno o a un porcentaje de cobertura de eventos pluviales. En la siguiente tabla se presentan los valores hidrológicos determinados para el arroyo la Culebra y se marcan los valores considerados de potencial riesgo. La tormenta de diseño es de 37.5 mm (o valor percentil 95) lo que representa que sólo el 5% de las lluvias registradas de 1982 al 2012 por la estación DGE fueron mayores.

Segmento	Área drenada (km <sup>2</sup> )	Pendiente Media	Vol. (m <sup>3</sup> )	Tiempo de concentración (min)	Caudal pico Qp (m <sup>3</sup> /s)
La Culebra	20.61	5.7%	154,575	74.49	34.6
C0	6.12	2.1%	11,475	83.09	2.3
C00	1.28	4.3%	4,800	18.80	4.3
C01	3.30	2.6%	12,375	55.22	3.7
C1	15.12	6.0%	85,050	70.37	20.1
C10	4.29	4.1%	16,088	30.18	8.9
C11	10.43	6.0%	39,113	68.24	9.6
C110	1.73	8.3%	6,488	15.72	6.9
C111	8.21	6.4%	30,788	61.57	8.3
C1110	0.69	2.7%	1,294	20.53	1.1
C1111	5.73	8.5%	21,488	39.48	9.1

**Tabla 13.** Segmentos y afluentes del arroyo la Culebra de potencial riesgo para la población ante una tormenta del percentil 95 (37.5 mm).

Fuente: elaboración propia.

Por un lado se señalan aquellas pendientes promedio que superan el 5%, por su relación con la velocidad de la corriente. Aquellos tiempos de concentración de 30 minutos o menores también se señalan. De acuerdo a los criterios definidos en la sección 8.3.3 se clasifican los caudales de riesgo medio a los valores comprendidos entre 2.5 y 5 m<sup>3</sup>/s y de riesgo alto todos aquellos que superen los 5 m<sup>3</sup>/s. De igual forma se señalan valores considerados muy altos por ser superiores a 20 m<sup>3</sup>/s. En la figura 32 se ubican los puntos críticos de la tabla bajo el mismo esquema de colores. Los círculos con una cruz representan los segmentos críticos identificados por sus caudales pico, mientras que el símbolo con forma de “aspa”, “moño” o “reloj de arena” identifica a los segmentos críticos por el tiempo de concentración.



**Figura 32.** Mapa de riesgos por desbordamiento y arrastre correspondientes al área tributaria al Arroyo de la Culebra  
Fuente: elaboración propia sobre mapa base SIATL (INEGI, 2015)

Del análisis del arroyo La Culebra de acuerdo a las variables hidrológicas se identifican posibles zonas de riesgo que debieran derivar en una revisión minuciosa y periódica de los cauces identificados. Esto tendría el propósito de determinar entre otras cosas

- la capacidad de los cauces para conducir los volúmenes calculados de acuerdo a las diferentes secciones existentes,
- desviaciones del cauce y los efectos de estos ante eventos máximos,
- caminos y cruces a través del cauce
- invasión de cauces

### Zonificación propuesta

De acuerdo a los análisis previos, las zonas de manejo de agua pluvial se definieron a partir de las reservas urbanas y usos de suelo agrícolas con potencial para almacenamiento de agua pluvial y otros posibles usos. De igual forma, las distintas zonas de riesgo se definieron en concordancia con los análisis realizados para identificarlos.

Las partes altas de la microcuenca al ser los puntos donde ocurre la recarga de los mantos subterráneos se clasifican como Áreas de Protección a Acuíferos.

Aunque la actividad agropecuaria no desaparece, esta tendrá que depender totalmente del agua de lluvia en virtud de que la zona de veda de extracción de agua del subsuelo cubriría toda la superficie de la cuenca. Además, al ubicarse en Áreas para manejo de agua pluvial, quedarán sujetas a las medidas que se consideren necesarias para restablecer el funcionamiento de la subcuenca.

Todo lo anterior se resume en la siguiente imagen:

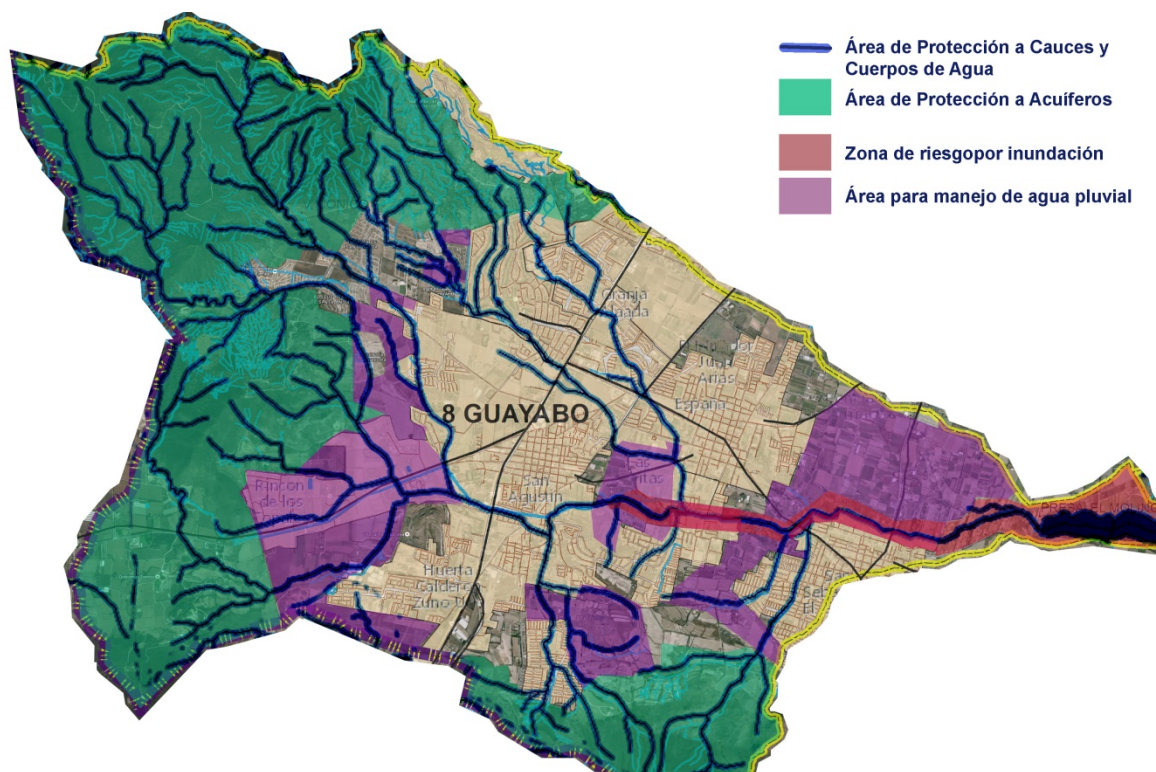


Figura 33. Zonificación propuesta para la subcuenca del Guayabo.

Fuente: elaboración propia a partir de bases de datos (INEGI, 2010) y fotos aéreas (Google, 2015).

Áreas de Protección a Acuíferos	40.0%
Zonas de riesgo por inundación	3.5%
Cuerpos de agua	1.0%
Áreas de manejo de agua pluvial	13.5%
Área urbanizada	42.0%

**Tabla 14.** Relación de superficies de acuerdo a la zonificación propuesta.

Fuente: elaboración propia.

Los efectos esperados de la nueva zonificación son los siguientes:

- detener de forma efectiva la expansión urbana en la zona,
- conservar los cauces, zonas de recarga, bosques y arbolado que aún no han sido perturbados,
- proteger a la población de inundaciones,
- contar con espacio para filtrar y almacenar el agua de lluvia

#### 8.1.4 Diagnóstico del funcionamiento hidrológico de la subcuenca del Guayabo

Es importante es conservar los volúmenes de infiltración, escorrentía y evapo-transpiración originales de un sitio para no perturbar el ciclo “micro” del agua. Por tanto, el primer paso consiste en conocer el funcionamiento original de la cuenca. Posteriormente se estima la alteración causada por la urbanización del territorio. A partir del diagnóstico se pueden definir acciones para reducir los volúmenes de escorrentía y recuperar los volúmenes de infiltración anteriores.

Los volúmenes de infiltración, escorrentía y evaporación en condiciones previas a la urbanización dependen principalmente de las características particulares de la lluvia de la zona, el tipo de suelo, las pendientes presentes en la superficie y las características de la cubierta vegetal.

Para efectuar el diagnóstico del funcionamiento hidrológico se procede a estimar la infiltración del territorio previa a la urbanización. Para este propósito se recurre al método empleado por la EPA para determinar la capacidad de infiltración de un sitio en términos de la altura de una tormenta tipo y explicado en el Estado del Arte.

Las características hidrológicas de los suelos presentes en la subcuenca se encuentran entre los suelos B y C de la clasificación hidrológica de la EPA (ver Tabla 4 de la sección “6.2.1 Manejo de escorrentía en edificios”). De acuerdo con la Tabla 5 (presentada en la misma sección que la Tabla 4), los niveles de lluvia infiltrados después de una hora son 44.4 mm para el suelo B y 21.25 mm



para el tipo C. Se toma el valor de una hora por corresponder a la duración promedio de las tormentas en la zona.

A falta de un registro disponible de precipitación diaria por 25 o más años, se recurrió a los registros correspondientes a la estación meteorológica DGE, ubicada en Guadalajara para obtener la distribución de las lluvias de acuerdo a la precipitación diaria. En la tabla presentada a continuación se busca el valor más cercano a los niveles de lluvia infiltrados por los suelos B y C. El rango de infiltración de acuerdo a estos datos va del 78 al 96%.

Distribución de precipitaciones diarias en Guadalajara (DGE 1982-2011)			
Precipitaciones diarias	Contribución al volumen total	Contribución al volumen total	Precipitaciones diarias menores a (mm)
< 5 mm	31.8%	25%	3.5
< 10 mm	52.2%	33.3%	5.5
< 15 mm	66.8%	50.0%	9.5
< 20 mm	77.1%	66.6%	15
< 25 mm	84.0%	75.0%	19
< 30 mm	89.1%	80.0%	22
< 35 mm	92.6%	85.0%	26
< 40 mm	94.9%	90.0%	31
< 45 mm	96.3%	95.0%	40.5
< 50 mm	97.4%	99.0%	66

Tabla 15. Distribución de precipitaciones diarias de Guadalajara (DGE 1982-2011).  
Fuente: Elaboración propia a partir de la Base de Datos Climatológica Nacional (CICESE, 2015)

Si por otro lado se consultan los índices de escurrimiento proporcionados por la Comisión Estatal del Agua (Tabla 6), se tiene que para un suelo arenoso y plano es un valor entre 0.05 y 0.1, mientras que es de 0.13 a 0.17 si se trata de un terreno arcilloso plano, lo cual se acerca a los resultados obtenidos para los suelos B y C.

En condiciones naturales, se esperarí un comportamiento como el que sigue:

Tipo de suelo	Proporción del área total	Infiltración	Infiltración proporcional
Suelo tipo B, pendiente menor a 5%	30%	95%	29%
Suelo tipo B, pendiente: 5-15%	23%	85%	20%
Suelo tipo B, pendiente: 15-25%	10%	80%	8%
Suelo tipo B, pendiente mayor a 25%	32%	70%	22%
Suelo tipo C, pendiente menor a 2%	5%	80%	4%
		TOTAL	82%

**Tabla 16.** Estimación de la infiltración de la subcuenca del Guayabo en condiciones originales.  
Fuente: Elaboración propia utilizando información de la CEA (CEA, 2010).

Esto muestra que la subcuenca del Guayabo aún en su estado original debido a la pendiente del terreno tenía escurrimientos superiores al 15% de las lluvias recibidas.

A continuación se determina de forma cuantitativa la alteración causada por la urbanización. Utilizando el mismo método se puede estimar los valores de infiltración correspondientes a un territorio urbanizado. En este caso se requiere conocer los valores de escorrentía de acuerdo a usos de suelo (en la Tabla 6 se muestran los valores propuestos por la CEA) y el tamaño de estas superficies. Al aplicar este método para estimar el comportamiento hidrológico actual de la subcuenca, se obtiene lo siguiente:

Área	Proporción del área total	Infiltración	Infiltración proporcional
Áreas de Protección a Acuíferos pendiente 15-25%	8%	80%	6.4%
Áreas de Protección a Acuíferos pendiente > 25%	32%	70%	22.4%
Zonas de riesgo por inundación	4%	80%	2.8%
Cuerpos de agua	1%	5%	0.1%
Áreas de manejo de agua pluvial	14%	85%	11.5%
Habitacional media densidad	13%	45%	5.9%
Habitacional baja densidad	18%	25%	4.5%



## Caracterización de la subcuenca del Guayabo para el aprovechamiento de agua pluvial en el desarrollo urbano en la Zona Metropolitana de Guadalajara

Vialidades	3%	3%	0.1%
Comercial	7%	5%	0.4%
Industrial	1%	15%	0.2%
			TOTAL
			54.1%

**Tabla 17.** Estimación de la infiltración de la subcuenca del Guayabo bajo las condiciones actuales.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con esta última tabla, los escurrimientos anuales de la subcuenca representan más del 40% de las precipitaciones, es decir, más de 27 millones de metros cúbicos en promedio.

### 8.1.5 Densidad de edificación

A grosso modo, la densidad de edificación del territorio debería estar afectada por la capacidad de carga hídrica del mismo definida por los límites de crecimiento ya explicados, de tal manera que la población contenida dentro de su perímetro no excediera en número la cantidad de gente

De forma particular, la densidad de ocupación del territorio estaría definida por los objetivos hidrológicos de cada área, que debieran definirse de acuerdo a la capacidad de infiltración debida al tipo de suelo, pendiente y otros factores.

Es preferible edificar en zonas donde el suelo sea de baja capacidad de que uno con alta permeabilidad.

El método empleado en la sección anterior para realizar el diagnóstico del funcionamiento hidrológico puede servir para hacer proyecciones de la permeabilidad y escorrentía que resultarían de aplicar un plan urbano con densidades y usos de suelo determinados. Esta herramienta también permite comparar varias alternativas en términos del funcionamiento hidrológico.

Dado que las edificaciones y las vialidades restringen la permeabilidad del suelo que está debajo, se requieren soluciones que permitan el desarrollo urbano y al mismo tiempo preserven los volúmenes de infiltración originales del territorio.

Si este problema se ataca a partir de la lógica de la vivienda horizontal, implicaría aumentar las dimensiones de los lotes de modo que las viviendas cuenten con suficientes áreas permeables para cumplir con los objetivos hidrológicos. Sin embargo esto podría resultar inviable pues el tamaño del predio está ligado a precio de venta y capacidad del mercado para pagarlo. De forma alternativa, estas áreas permeables podrían trasladarse a las áreas comunes y de cesión, aunque

nuevamente resultaría en una menor utilidad para los desarrolladores o en un mayor costo de la vivienda.

Una alternativa para poder aumentar la densidad de habitantes sin alterar tanto el funcionamiento hidrológico sería que la vivienda fuera vertical. De este modo se reduciría el porcentaje de ocupación del suelo aunque se debería tener cuidado de conservar la permeabilidad del territorio restante.

De forma complementaria, se puede mejorar la capacidad de infiltración y retención de un territorio mediante la implementación masiva de SuDS distribuidos en una zona en particular. Queda fuera del alcance de este trabajo determinar qué tanto se pueden mejorar los parámetros de infiltración de grandes superficies mediante la introducción de estos elementos de infraestructura verde.

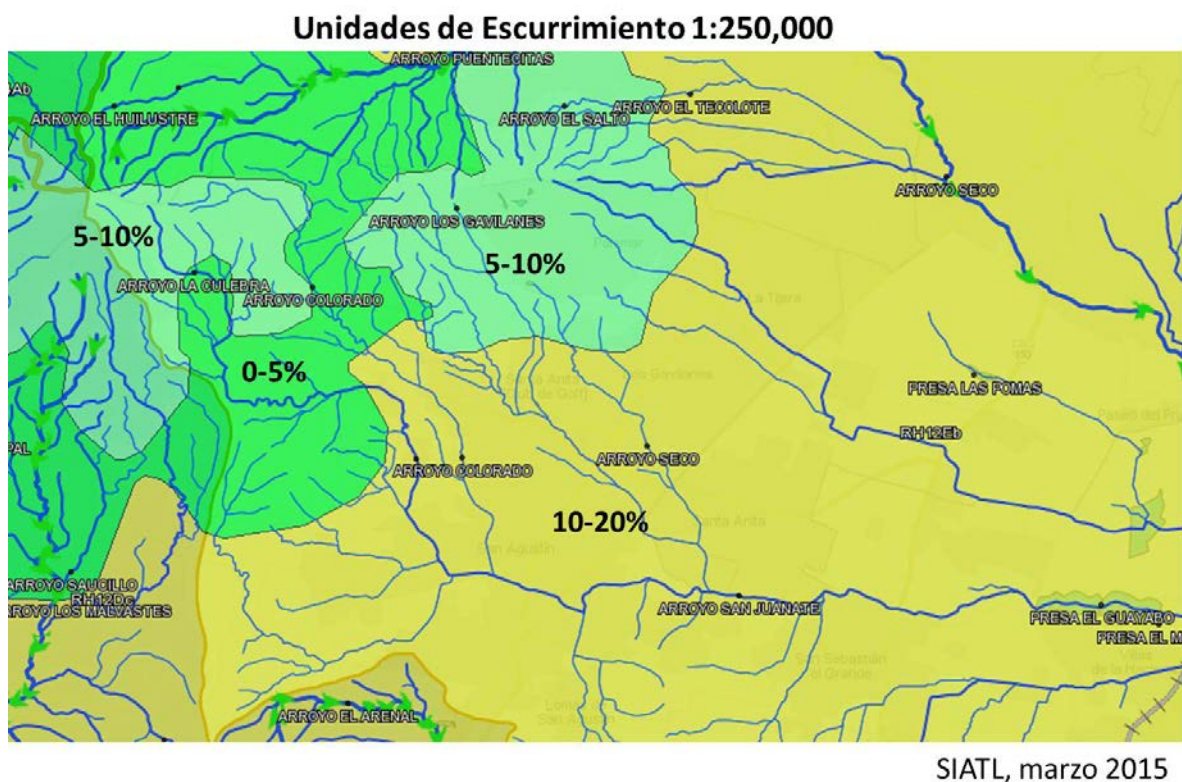
### 8.1.6 Acciones prioritarias

#### 8.1.6.1 Almacenamiento de escurrimientos

En la sección 8.1.3 se presentan zonas con potencial para el almacenamiento de agua de lluvia. Para aplicar esta metodología se eligió el arroyo La Culebra por las siguientes razones:

- a) Es el más caudaloso de los afluentes de la subcuenca,
- b) Los caudales pico generados ante una tormenta son altos así como la velocidad de la corriente.
- c) Con base en los caudales pico y tiempos de concentración se identificaron puntos de riesgo por desbordamiento y arrastre en este arroyo y sus afluentes.
- d) A su alrededor cuenta con grandes áreas no urbanizadas y por lo tanto con menor riesgo de contaminación.

Considerando un escurrimiento del 10% de las precipitaciones anuales (se estima un coeficiente de escurrimiento del 10% con base al plano 1:250,000 de unidades de escurrimiento presentado en el SIATL, INEGI), la esorrentía promedio anual rondaría por los siete millones de m<sup>3</sup>, volumen equiparable a la demanda de una población de 75,000 habitantes con una dotación de 250 litros diarios, 93,750 con 200 litros por día o 125,000 habitantes (aproximadamente la población que habita la subcuenca) con 150 litros diarios. En el último escenario se estaría alcanzando la autonomía hídrica de esta área, es decir, no se requeriría un suministro externo ni se comprometería el abasto futuro.



**Figura 34.** Plano de unidades de escurrimiento en la subcuenca del Guayabo.  
Fuente: SIATL (INEGI, 2015).

El arroyo de La Culebra y sus afluentes descienden del Bosque de la Primavera y recuperan una cuarta parte del agua pluvial de la subcuenca del Guayabo. El agua que escurre de las montañas arrastra principalmente tierra, piedras y materiales vegetales, por lo que el proceso de potabilización sería más sencillo en esta zona. De todo este arroyo, tanto el afluente C0, como la confluencia de C1111 con C1110 no atraviesan zonas urbanizadas, lo cual resulta en mejor calidad del agua y permite la utilización del territorio para obras de infraestructura para conducción, almacenamiento y potabilización. Entre ambos segmentos representan dos terceras partes del agua recogida por la Culebra y un sexto del total de la subcuenca.

Fuente tabla: elaboración propia.

## Diseño de reservorio

Primera, hay que definir la capacidad óptima del embalse, de forma que este no se llene muy rápido o que esté por debajo de su capacidad de forma permanente. Para calcular el volumen de escorrentía media anual  $V_o$ , partimos del volumen que se espera captar con base en la precipitación media anual  $P_o$ , el área drenada  $A$  y el coeficiente de escurrimiento  $c$ .

A partir de este volumen calculado, una vez sustraídas las pérdidas estimadas  $V_p$ , se prorratea por segundo para encontrar el gasto máximo  $Q$  que se podría proporcionar de forma constante a lo largo del año.

Tómese como ejemplo el afluente C0, ignorando por el momento la evaporación. El volumen almacenado en el reservorio será resultado de considerar las ganancias por escorrentía y las pérdidas por consumo más lo que ya estaba almacenado. Este volumen de agua consumido de forma continua equivaldría a 17.1 l/s. Para determinar la demanda cubierta  $D$  en número de personas, el volumen de agua disponible sólo se reparte entre los días del año y la dotación  $d$  que

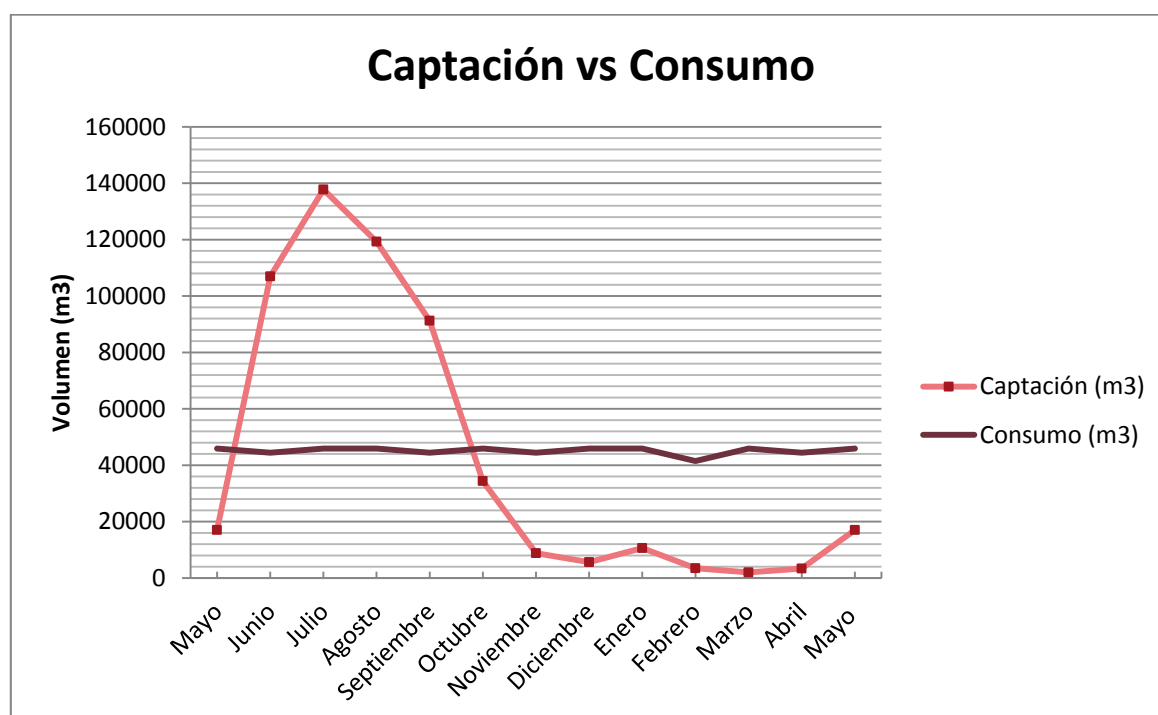
## Caracterización de la subcuenca del Guayabo para el aprovechamiento de agua pluvial en el desarrollo urbano en la Zona Metropolitana de Guadalajara

se haya definido. Para una dotación de 250 l/día, la población atendida de forma constante ligeramente supera 5900 habitantes.

	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Anual
Precipitación (mm)	174.8	225.1	194.9	149.1	56.2	14.4	9.2	17.4	5.7	3.3	5.5	27.9	883.5
Captación (m3)	106977.6	137761.2	119278.8	91249.2	34394.4	8812.8	5630.4	10648.8	3488.4	2019.6	3366	17074.8	540702
Consumo (m3)	44441.3	45922.6	45922.6	44441.3	45922.6	44441.3	45922.6	45922.6	41478.5	45922.6	44441.3	45922.6	
Vol. almacenado (m3)	62536.3	154374.9	227731.1	<b>274539.0</b>	263010.8	227382.3	187090.1	151816.2	113826.1	69923.1	28847.8	0.0	
Nivel (m)	3.25	8.02	11.83	<b>14.26</b>	13.66	11.81	9.72	7.89	5.91	3.63	1.50	0.00	
											Superficie:	<b>19250 m2</b>	

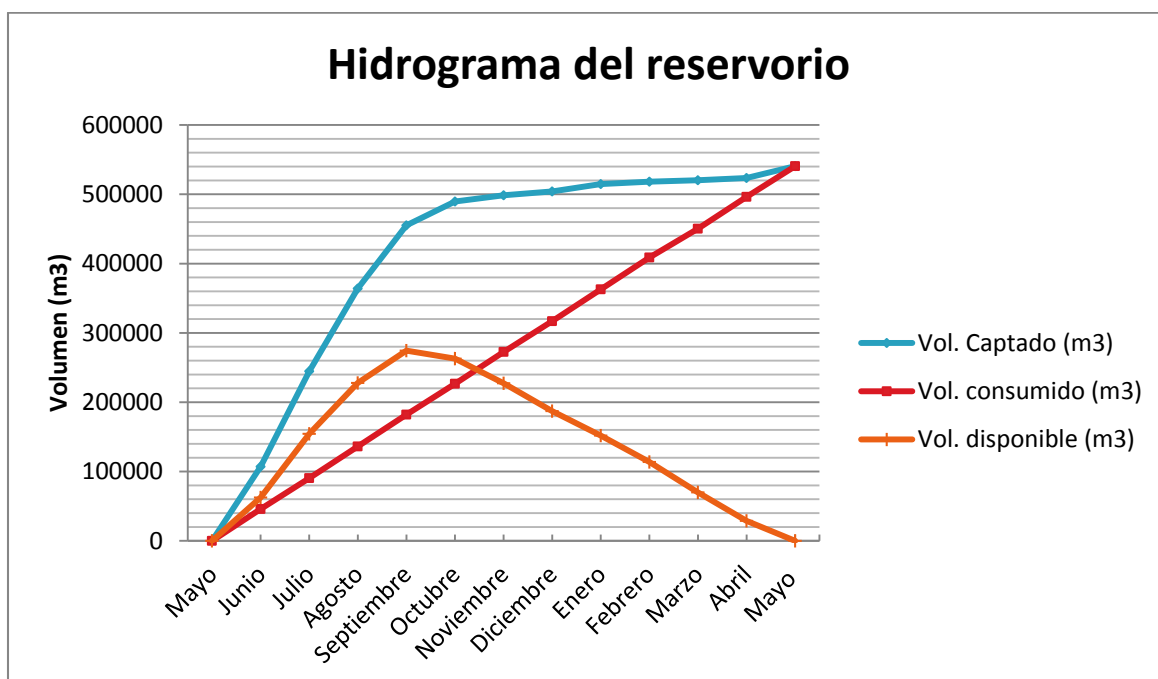
**Tabla 18.** Análisis de flujo de agua almacenada para el reservorio planteado.

Fuente: elaboración propia.



**Figura 36.** Hidrograma donde se contrasta la captación de agua pluvial mensual estimada a lo largo del año contra el consumo mensual supuesto (demanda constante).

Fuente: elaboración propia.



**Figura 37.** Hidrograma donde se muestra la variación en volumen de agua disponible en el reservorio en conjunto con el volumen acumulado de agua pluvial captada y el volumen acumulado de consumo.

Fuente: elaboración propia.

A partir de este análisis se puede definir la capacidad del reservorio, de modo tal que pueda contener el volumen máximo alcanzado considerando las fluctuaciones producidas por las entradas y salidas. En el caso de estudio, el volumen máximo almacenado se alcanza en septiembre (274,539 m<sup>3</sup>). Obsérvese que este volumen es prácticamente la mitad del volumen recolectado durante todo el año. Para efectos prácticos se redondeó a 275,000 m<sup>3</sup> y se aplicó un margen de seguridad (en este caso 5 La capacidad máxima real del reservorio sería entonces 288,750 m<sup>3</sup>. Para determinar una superficie tentativa, en este caso se tomó una profundidad de 15 metros como variable definida. De esta forma, se estableció que una superficie de 19,250 m<sup>2</sup> puede almacenar los 275 mil metros cúbicos de agua pluvial.

### Consumo constante considerando evaporación

El agua almacenada en un cuerpo libre, como un reservorio, es susceptible de tener pérdidas por evaporación. Para estimar esta evaporación en este trabajo se utilizó el balance energético de Penmann, el nomograma de Penmann, fórmulas empíricas o la medición directa por evaporímetros y tanques. Las dos primeras requieren además de la temperatura media, humedad relativa y duración de insolación, la velocidad del viento 2 m por encima del cuerpo de agua. Ante la dificultad de conseguir datos y la inexistencia de mediciones de evaporación en la zona, se buscaron ejemplos de cuerpos de agua en la región que ya han sido estudiados. El lago de Chapala



## Caracterización de la subcuenca del Guayabo para el aprovechamiento de agua pluvial en el desarrollo urbano en la Zona Metropolitana de Guadalajara

cuya profundidad promedio es de 4.86m tiene una evaporación anual de 1477 mm. Para el ejercicio se toma una evaporación de 1500 mm anuales. El volumen evaporado va, entonces en función de la superficie libre, cuanto mayor sea la superficie, mayor la pérdida. Supóngase un cuerpo de agua de 15m de profundidad, la pérdida por evaporación sería del 10% de la capacidad del cuerpo de agua.

Para definir la evaporación mensual, se hace la consideración de que esta es directamente proporcional a la evapotranspiración potencial (ETP). Esta puede calcularse a partir de la temperatura mensual promedio y latitud por el método de Thornthwaite (consultar Anexo 2). Habiéndose definido la evaporación esperada anual en 1500 mm y siendo la ETP anual de 926 mm para el municipio de Tlajomulco, el factor de ajuste mensual será de 1.62:

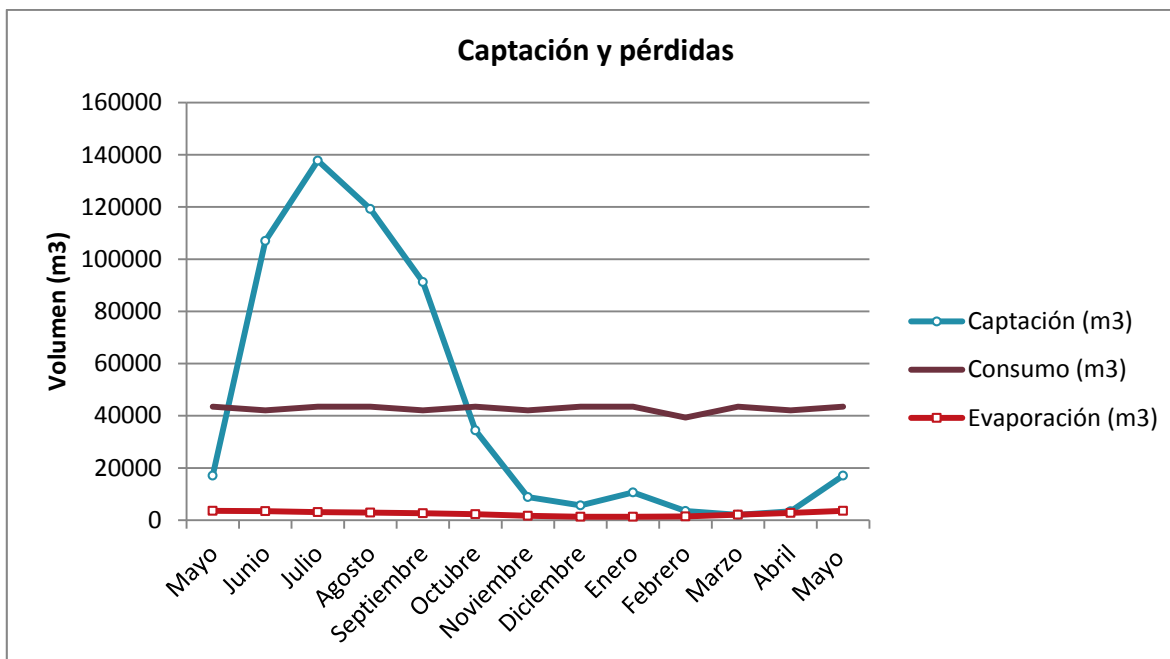
	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Anual
Precipitación (mm)	174.8	225.1	194.9	149.1	56.2	14.4	9.2	17.4	5.7	3.3	5.5	27.9	883.5
ETP (mm)	112.65	100.18	94.28	85.20	73.90	53.36	43.14	41.82	46.39	68.55	90.70	115.87	926.04
Ev (mm)	182.48	162.27	152.71	138.01	119.70	86.44	69.88	67.74	75.14	111.04	146.91	187.68	1500.00

**Tabla 19.** Tabla que reúne la precipitación mensual, la evapotranspiración potencial (ETP) y la evaporación esperada.  
Fuente: Elaboración propia.

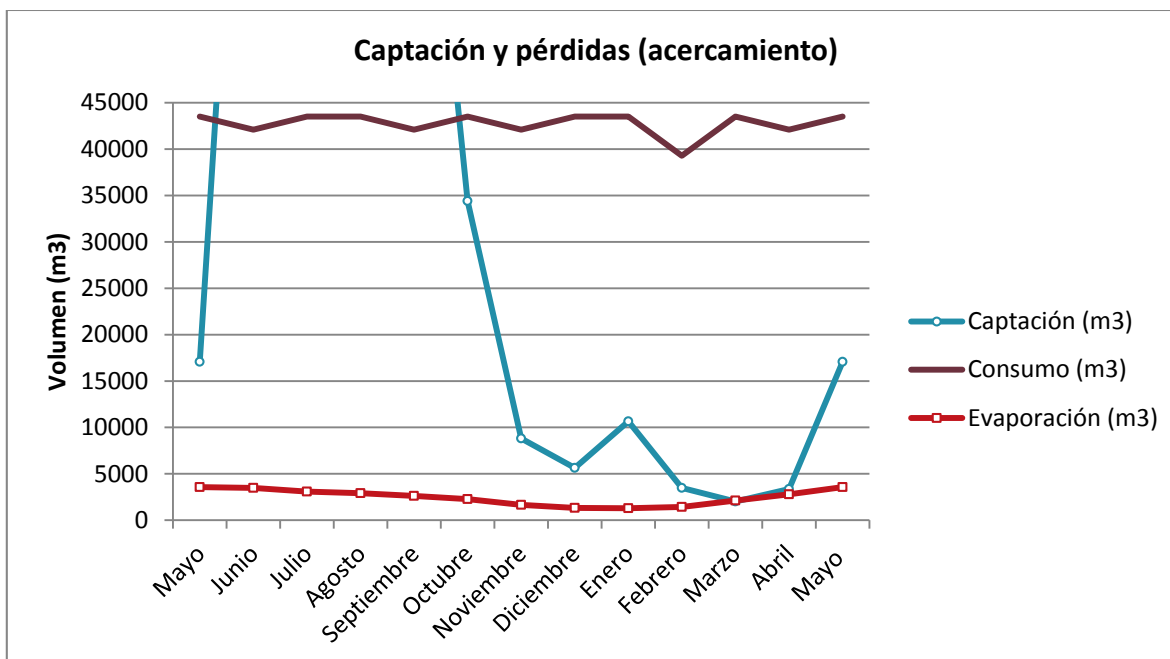
El volumen evaporado resultará de multiplicar la profundidad de agua evaporada (en metros) por la superficie del reservorio. Por tanto, las pérdidas totales de evaporación se estiman en 28,875m<sup>3</sup>, lo que representa el 5.3% del total de agua pluvial recuperada durante el año. Por estas pérdidas, el gasto se reduce a 16.2 l/s.

	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Anual
Precipitación (mm)	174.8	225.1	194.9	149.1	56.2	14.4	9.2	17.4	5.7	3.3	5.5	27.9	883.5
Captación (m3)	106977.6	137761.2	119278.8	91249.2	34394.4	8812.8	5630.4	10648.8	3488.4	2019.6	3366	17074.8	540702
Evaporación (m3)	3474.37	3089.55	2907.60	2627.72	2279.17	1645.77	1330.54	1289.81	1430.70	2114.18	2797.17	3573.43	28560.00
Consumo (m3)	42093.9	43497.0	43497.0	42093.9	43497.0	42093.9	43497.0	43497.0	39287.6	43497.0	42093.9	43497.0	
Vol. almacenado (m3)	61409.4	152584.0	225458.2	<b>271985.8</b>	260604.1	225677.3	186480.1	152342.1	115112.2	71520.6	29995.6	0.0	
Nivel (m)	3.23	8.01	11.84	<b>14.28</b>	13.69	11.85	9.79	8.00	6.05	3.76	1.58	0.00	
Superficie:													19040

**Tabla 20.** Flujo de agua en el reservorio considerando pérdidas esperadas por evaporación, un consumo hipotético.  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 38.** Hidrograma donde se contrasta la captación de agua pluvial mensual estimada a lo largo del año contra el consumo mensual supuesto (demanda constante) y la evaporación estimada.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 39.** Acercamiento a la parte inferior del hidrograma anterior para apreciar la magnitud de la evaporación.  
Fuente: elaboración propia.

#### 8.1.6.2 *Reforestación*

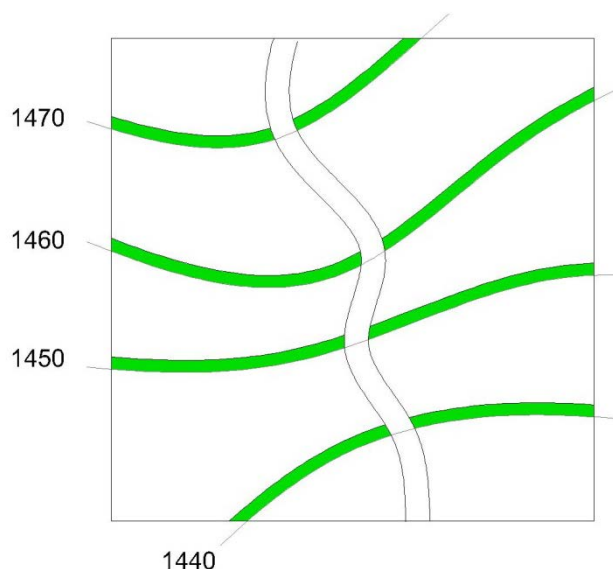
La reforestación trata de abonar en varios frentes:

- a) retardar los escurrimientos de agua de forma que se facilite la infiltración y se disminuya el caudal máximo presente cauce abajo;
- b) retener el suelo, con los beneficios que esto implica para el sistema donde este se encuentra y también disminuir los volúmenes de sólidos inorgánicos disueltos y arrastrados que eventualmente tendrán que ser retirados
- c) generar un círculo virtuoso de evapotranspiración y precipitación, con el resultado de una mayor cosecha de agua

Si bien los puntos altos son importantes para este propósito, no son los únicos. El porcentaje de área con cubierta vegetal es relevante para abonar al propósito c) .

#### **Cotas verdes o franjas de arbolado**

Se propone como medida para proteger el suelo de la erosión y frenar los escurrimientos aunque de ninguna forma elimina la necesidad de contar con arbolado en otras zonas. Consiste en establecer franjas de cubierta vegetal paralelas a las curvas de nivel. Como propuesta se plantea que estas se ubiquen por cada 10 metros de elevación sobre el nivel del mar, con un ancho mínimo de 10 metros. El efecto esperado es que en las zonas con mayor pendiente, exista mayor arbolado que ayude a frenar y retener al menos parcialmente los escurrimientos. De igual forma, estos cinturones de vegetación rompen la continuidad de las áreas impermeables como se sugiere en las estrategias de LID. Convendría que estas franjas se extendieran a todo lo largo de la misma cota salvo en los puntos necesarios para permitir el paso de vialidades colectoras. En la siguiente figura, se muestra un ejemplo de esta estrategia.



**Figura 40.** Ejemplo de cotas verdes en el territorio paralelas a las curvas de nivel.  
Fuente: elaboración propia.

Para entender mejor esta propuesta, en la Tabla 9 se presenta el paso o frecuencia horizontal de las franjas, distancias de separación y porcentaje del terreno destinado a esta solución de acuerdo al porcentaje de extensión de la franja con respecto a la extensión de la cota, referida en la tabla como porcentaje de cobertura. La frecuencia representa la distancia a la cual se debe situar una franja para una pendiente dada. El espacio intermedio es la mínima distancia que mediaría entre dos franjas consecutivas con traslape. La densidad es el porcentaje de área empleada de la superficie total de acuerdo a un porcentaje de cobertura de la cota.

Pendiente	Frecuencia (m)	Espacio intermedio (m)	Densidad al 20% de cobertura	Densidad al 50% de cobertura	Densidad al 66% de cobertura
1%	1000.00	990.00	0.2%	0.5%	0.7%
2%	500.00	490.00	0.4%	1.0%	1.3%
5%	200.00	190.00	1.0%	2.5%	3.3%
10%	100.00	90.00	2.0%	5.0%	6.6%
20%	50.00	40.00	4.0%	10.0%	13.2%
30%	33.33	23.33	6.0%	15.0%	19.8%
50%	20.00	10.00	10.0%	25.0%	33.0%
100%	10.00	0.00	20.0%	50.0%	66.0%

**Tabla 21.** Relación del arbolado y la pendiente del área analizada con la introducción de cotas verdes.  
Fuente: elaboración propia.

Como parte del criterio de definición de las distancias entre cotas y las dimensiones de estas, se buscaba que las superficies con pendientes del 100% y mayores estuvieran completamente arboladas, lo cual sucede cuando ya no queda espacio intermedio entre cotas.

#### *8.1.6.3 Separación de aguas negras de aguas pluviales a lo largo del cauce*

Según el censo del 2010, la subcuenca del Guayabo cuenta con 97,185 habitantes. Considerando un consumo promedio de 250 litros por persona por día, los habitantes en la subcuenca producen anualmente 8.87 millones de metros cúbicos de agua residual. En virtud de que actualmente se junta el agua residual doméstica con el agua pluvial, esto conlleva a que el volumen de agua negra aumente a 39 millones de metros cúbicos.

Con base en lo anterior, resulta prioritario para un adecuado manejo del recurso hídrico, la separación de agua pluvial de la de agua residual doméstica.

Se tiene localizada específicamente la descarga de aguas negras al cauce principal en su paso por la calle Cuauhtémoc a la entrada de la población de San Sebastián el Grande. De igual forma, múltiples viviendas colindan con los márgenes del cauce, siendo muy probable que estas descarguen directamente al cuerpo de agua.

Cabe esperar la misma situación en otras localidades, tales como Santa Anita y San Agustín, dado que a su salida los afluentes Arroyo Seco y La Culebra se observan con caudales turbios y jabonosos fuera de temporal y se perciben malos olores.

Básicamente se esperaría que se instalaran colectores de drenaje cerrados que recolectaran todas las descargas de las viviendas. El tratamiento posterior sería un proyecto secundario y dependería de las condiciones específicas: caudal de descargas, área disponible, carácter de las descargas (domésticas, industriales, agropecuarias, etc).

Se requiere investigar el estado y capacidad de la red de drenaje y todos los puntos de descarga existentes. Estratégicamente conviene resolver las descargas de las localidades desde un inicio. De igual forma habrá que ir resolviendo de afluente por afluente de la parte más alta a la más baja de forma que se vayan eligiendo los afluentes que convergen en un punto en común.

Se requerirá también de un plan de monitoreo y protección que vigile la calidad del agua y detecte el vertido de impurezas al cauce.

### 8.1.7 Estrategias de implementación

Con el objetivo de fomentar y facilitar el cumplimiento de este plan se podría hacer uso de herramientas tales como incentivos, transferencias de derechos, pago por servicios ambientales, nuevas exigencias a las áreas de cesión, multas y cobros.

Como estrategia para incentivar el consumo e infiltración de agua pluvial y el reutilización de aguas grises, se podría cobrar por volumen de descargas al drenaje.

Para compensar a los propietarios de las tierras que se declarasen parte de las Áreas de Protección para la recarga de agua subterránea podrían recibir una compensación a modo de renta por concepto del agua que se infiltra. Si bien la recarga de acuíferos es un servicio ambiental primordial, en una cuenca hidrográfica se proporcionan otros servicios ambientales tales como protección de la cuenca hidrológica, fijación de carbono, conservación de la biodiversidad y belleza del paisaje (FAO, 2007).

Existen mecanismos ya establecidos llamados Pagos por Servicios Ambientales (PSA). Aplicados al contexto de la cuenca, suelen ser de la siguiente forma: existen proveedores de un servicio ambiental relacionado con el agua que proveen de ellos a los beneficiarios; estos a su vez compensan a los proveedores mediante pagos directos o a través de un intermediario. Es difícil definir un precio adecuado por estos servicios, pero usualmente se basa en la superficie del terreno destinado que genera los beneficios. Esta compensación por lo menos debiera cubrir el costo de oportunidad de cambiar a otro uso más rentable (FAO, 2007).

Para dar respaldo institucional a este mecanismo, conviene que existan organizaciones que representen a cada bando así como una institución intermediaria que regule tanto el cumplimiento cabal del otorgamiento del servicio como la cobranza de los pagos pero que a su vez sea sometida a mecanismos de transparencia. Convendrá además definir sanciones en caso de incumplimiento.



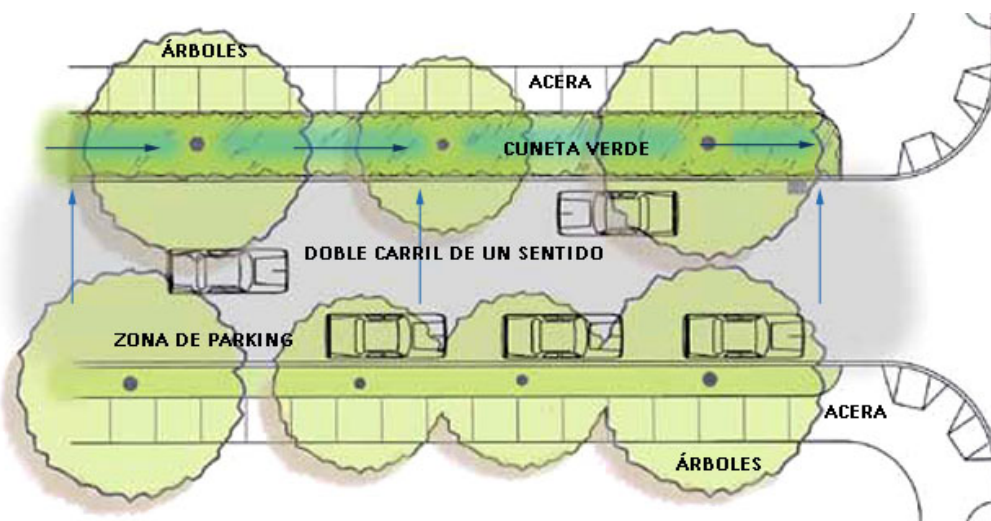
## 8.2 Acciones estratégicas en las escalas barrial y vecinal

En las escalas barrial y vecinal se propone la integración de infraestructura verde en el paisaje urbano como alternativa a la infraestructura hidráulica de drenaje pluvial. También se propone que los desarrolladores adopten la metodología de planeación de sitio propuesta por el Low Impact Development de modo que se utilice la hidrología natural del terreno como elemento compositivo y por tanto se reduzcan las alteraciones al funcionamiento hidrológico original.

### 8.2.1 Integración de infraestructura verde de drenaje pluvial en el territorio

Se plantea integrar elementos de infraestructura que cumplan con funciones hidráulicas y paisajísticas para captar, filtrar, retener, modular, transportar, almacenar e infiltrar agua, de forma que se pueda reproducir lo más fielmente posible, el ciclo hidrológico natural original. Estos elementos son de un costo mucho menor a la infraestructura convencional y a diferencia de esta pretenden resolver los problemas en el lugar de forma distribuida. Estos elementos han sido ampliamente cubiertos en la literatura de SuDS, WSUD y BMP.

Las cunetas verdes o *swales*, son áreas cubiertas de vegetación, largas y poco profundas con una depresión en el centro que se extiende longitudinalmente. Generalmente se ubican de tal forma que separen las zonas peatonales del arroyo vial. Su función es de retención, y filtrado de la escorrentía. Si se introduce diseño en la jardinería también pueden cumplir con una función estética.

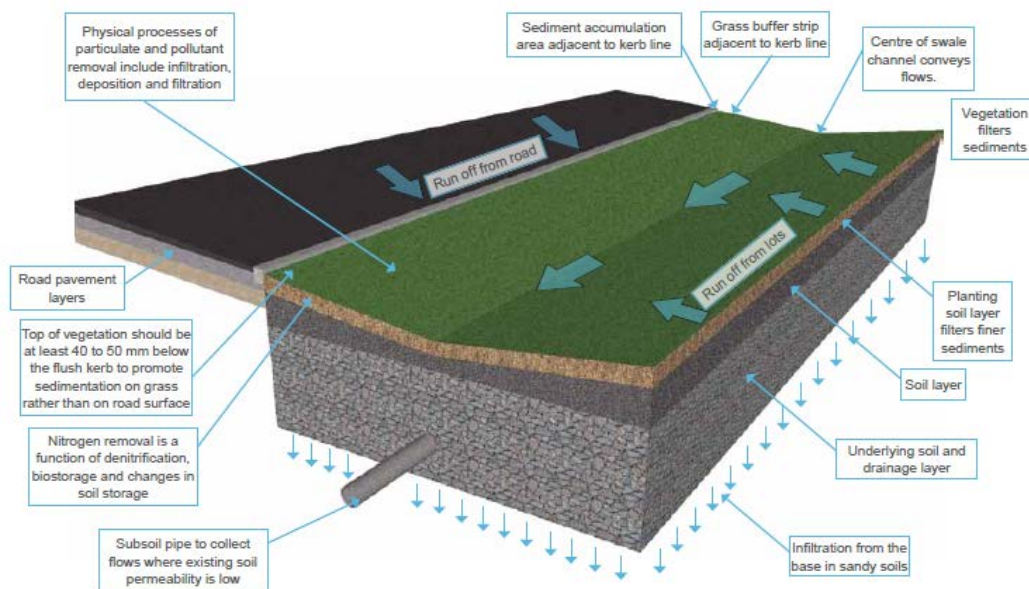


**Figura 41.** Localización recomendada de cunetas verdes. Vista en planta.  
Fuente: (Abellán, Ana, 2015).



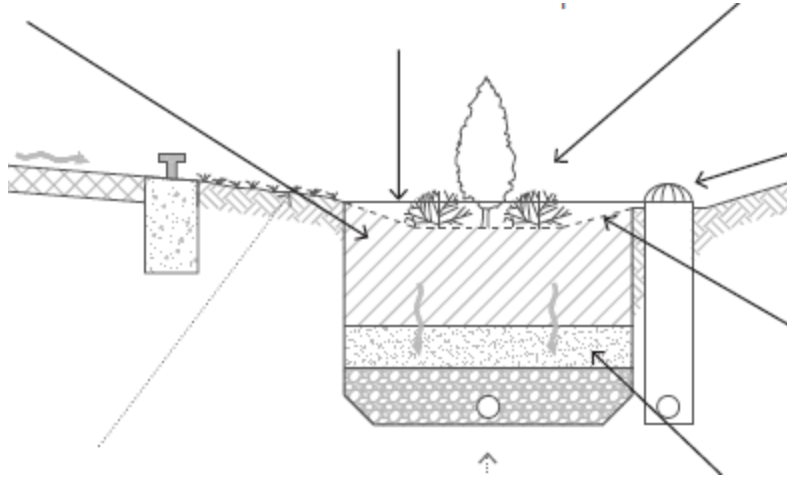
**Figura 42.** Implementación de una cuneta verde con diseño en una calle residencial.  
Fuente: (Abellán, Ana, 2015).

Una alternativa parecida es la de las franjas verdes (*filter strip* o *buffer strip*), que captan la escorrentía de las vialidades y otras áreas impermeables. Su forma permite distribuir el agua captado en una mayor superficie de infiltración (Ver siguiente imagen donde se muestra como la escorrentía es dirigida a la cuneta desde la vialidad u otras áreas verdes y por su forma se retiene el agua hasta que esta se infiltra).



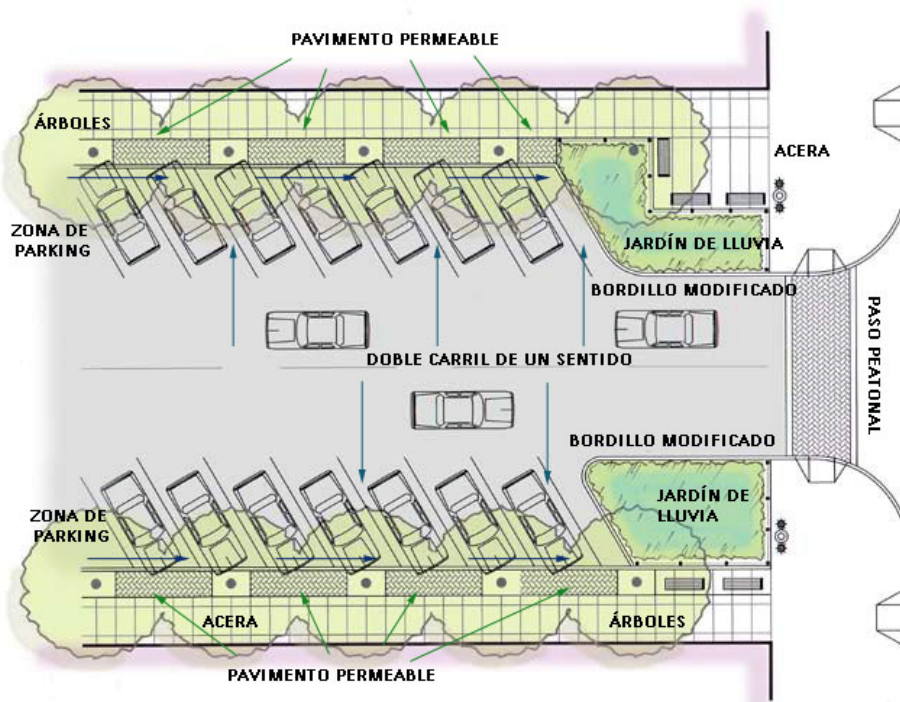
**Figura 43.** Diagrama explicativo de una franja verde (*filter strip* o *buffer strip*).  
Fuente: (Water, Western Australia Department of, 2011).

Los jardines de lluvia, aparte de cumplir con una función estética, sirven para retener, almacenar y filtrar el agua de lluvia. Es una excelente opción para retener los elementos contaminantes. En la figura siguiente se muestra como se ubica por debajo del nivel de las áreas vecinas para que los escurrimientos converjan hacia este. La primera capa de suelo es de una mezcla de arena con limo para filtrar los elementos contaminantes. La siguiente capa es de arena fina para retener el suelo y filtrar. De forma opcional, este sistema se puede integrar a un dren para conducir el agua filtrada.



**Figura 44.** Corte esquemático de un jardín de lluvia.

Fuente: (Auckland, Council of, s.f.)



**Figura 45.** Localización de jardines de lluvia y pavimentos permeables en calle comercial de alto tránsito. Vista en planta de calle.

Fuente: (Abellán, Ana, 2015)

La variedad de elementos que existen con este propósito es amplia y sirven a distintos propósitos. Se sugiere consultar el Estado del Arte para tener un panorama más amplio.

### 8.2.2 Urbanización y diseño de fraccionamientos

En lo que se refiere a la urbanización y diseño de fraccionamientos se propone considerar la metodología de diseño descrita por el Low Impact Development (LID). En principio no se prevé una diferencia irreconciliable con la realidad local.

Los conceptos fundamentales detrás de esta metodología son los siguientes:

- *Emplear la hidrología del sitio como tema compositivo del sitio y estructura de integración.* El propósito es imitar el comportamiento hidrológico del sitio. Por lo tanto se tiene que comprender las funciones hidrológicas originales del sitio y encontrar la forma de preservar estas funciones. Se deben identificar y preservar los puntos críticos tales como cauces, sus zonas de transición, pendientes, pantanos y zonas inundables, zonas de arbolado y suelos con alta permeabilidad. De esta forma se podrá definir un perímetro a desarrollar.
- *Adoptar un enfoque de manejo distribuido.* Se aplicaran técnicas específicas y puntuales de control repartidas por todo el territorio. Estas técnicas son llamadas IMPs (*integrated management practices*) y permiten controlar los volúmenes de escurrimiento y mantener las funciones originales de recarga de acuíferos.
- *Controlar los escurrimientos y el agua de lluvia desde el origen.* Antes de desarrollar el sitio, existían funciones hidrológicas tales como intercepción y almacenamiento en depresiones o cavidades e infiltración. Para restablecer estas funciones, se debe compensar la función afectada en el punto más cercano a la fuente de interferencia utilizando IMPs. El costo de la infraestructura se incrementa en función de la distancia al origen.
- *Utilizar métodos no estructurados.* Las técnicas a emplear requerirán de materiales que se pueden encontrar en el lugar. Se emplearán sistemas de microcontrol distribuidos e integrados al paisaje.
- *Diseñar un paisaje multifuncional o multipropósito.* Aparte de cumplir con una función estética, el paisaje servirá para compensar la función hidrológica requerida en un punto dado: filtración, infiltración, almacenamiento, retención, etc.

Esta metodología consta de dos etapas importantes en el diseño: la planeación del sitio y la introducción de elementos de control de la IMP (Integrated Management Practices). En la primera etapa se pretende minimizar los efectos en la hidrología producidos por el desarrollo en el terreno. Al final de esta etapa se realiza un análisis hidrológico que tiene como objetivo cuantificar tanto el comportamiento original como el planeado. La segunda etapa aprovecha los datos arrojados por el análisis para seleccionar las técnicas más apropiadas, definir sus características y su ubicación (Prince George, County of, 1999). De estas etapas, sólo se explicará a

detalle la primera. La segunda etapa entra en detalles técnicos que no corresponde mencionar aquí.

#### **Planeación del sitio.**

La incorporación de esta metodología en la planeación del sitio ayuda a alcanzar los objetivos previstos en términos de manejo de agua pluvial y escorrentía de modo que se conserven las funciones hidrológicas esenciales del lugar y al mismo tiempo permitir el desarrollo completo del sitio. Los objetivos hidrológicos generales del predio corresponderán a los establecidos para el polígono en que se ubique. Cuando se consideran desde el inicio es relativamente fácil cumplirlos, ya que se podrán aprovechar las condiciones naturales del lugar.

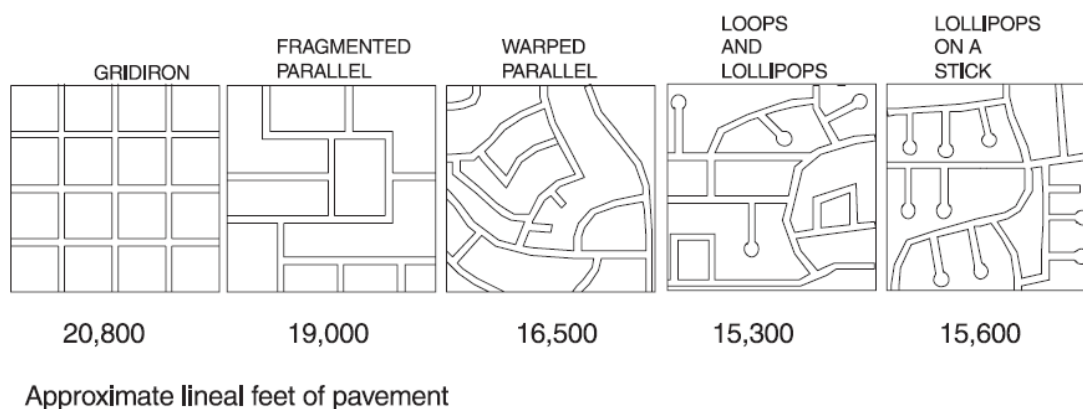
De acuerdo con la metodología LID (*Low Impact Development*) esto se puede lograr mediante una serie de pasos incrementales. Primero se buscará minimizar las afectaciones hidrológicas provocadas por el desarrollo del sitio, después de introducirán elementos para restablecer o mitigar las afectaciones inevitables al régimen hidrológico (Prince George, County of, 1999).

El proceso consiste en los siguientes pasos:

1. Identificar las regulaciones locales correspondientes.
2. Definir la envolvente o perímetro a desarrollar. Esto se logra identificando las áreas clave en el funcionamiento hidrológico original. La envolvente definirá el perímetro que no afecta estas zonas.
3. Emplear la hidrología y drenaje del sitio como elemento de diseño. El relieve original y la hidrología del lugar pueden fungir como elemento compositivo del terreno. Por tanto se buscará minimizar los movimientos de tierra y la limpieza de toda la cobertura vegetal original.
4. Reducir las áreas impermeables. La red de vialidades, las áreas de estacionamiento, banquetas y explanadas son la mayor fuente de superficie impermeable. Por tanto conviene prestar atención a su diseño para minimizar en lo posible la superficie empleada. El patrón de vialidades afecta de forma notable la longitud de las vialidades y por tanto la superficie impermeable (ver Figura 31). Evidentemente el ancho de la sección vial es otro parámetro a revisarse.
5. Conformar un plan de sitio preliminar. En este paso se analiza el funcionamiento hidrológico. Con base en los resultados del análisis se identificarán los ajustes que se requieren antes de proseguir.
6. Minimizar las áreas impermeables inevitables conectadas. Esto puede ser logrado mediante algunas estrategias definidas, tales como: redirigir los escurrimientos de los techos y áreas pavimentadas hacia áreas verdes estabilizadas, romper la convergencia de los flujos en las superficies pavimentadas grandes, localizar las áreas impermeables de forma que puedan drenarse hacia áreas verdes, cunetas verdes, depósitos de retención, franjas verdes, etc.



7. Modificar/incrementar los trayectos de los escurrimientos. Cuando los tiempos de concentración y los caudales se encuentren en valores no deseables, se pueden modificar aumentando la longitud de los trayectos, aumentando la rugosidad y pendiente de la superficie, el perfil de la sección del canal. Por otro lado, cuando estos escurrimientos sean a través del terreno natural, se debe limitar la velocidad del flujo a 1.5 m/s con el fin de evitar la erosión del suelo.
8. Análisis hidrológico. Se compara el comportamiento hidrológico original contra el comportamiento previsto después del desarrollo. Este paso servirá para evaluar el trabajo de diseño realizado y el grado de control adicional requerido que deberá ser logrado con la introducción de IMPs.
9. Completar el plan de sitio. Generalmente se llega a este paso después de varias iteraciones y ajustes al diseño.



**Figura 46.** Impermeabilidad y patrones de trazo de vialidades.  
Fuente: (Prince George, County of, 1999)

#### Otras recomendaciones:

De forma complementaria se señalan otras consideraciones que deberían ser consideradas en el diseño de fraccionamientos y colonias:

- Construir vialidades y designar áreas edificables en las zonas de menor afectación al funcionamiento hidrológico, por ejemplo, suelos arcillosos (que son poco permeables).
- Minimizar compactación y movimientos de tierra. Minimizar eliminación de vegetación del terreno
- Para prevenir la erosión y aumentar la retención de agua, se debería definir un porcentaje mínimo de área con cubierta vegetal.



### 8.3 Acciones estratégicas en la escala de la vivienda

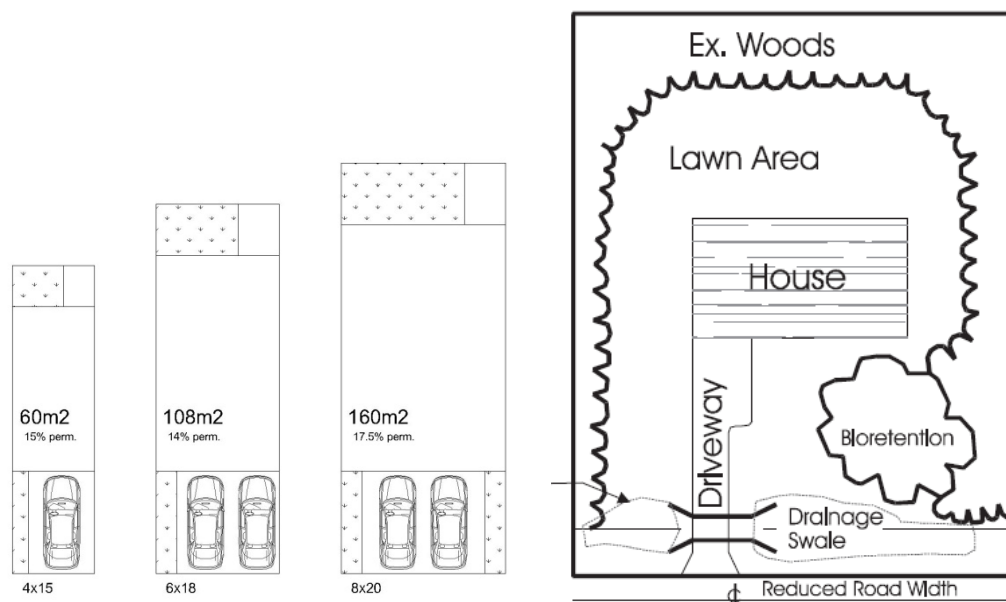
En lo que respecta a la escala de la vivienda se discuten los modelos de manejo de agua pluvial en países desarrollados y las implicaciones de aplicar estos principios a la realidad regional. Al final se introducen áreas de oportunidad donde la vivienda puede contribuir a lograr los objetivos hidrológicos propuestos.

#### 8.3.1 Prototipo de vivienda y tamaño predios

La estrategia de estos métodos es de “abajo hacia arriba” (bottom-up) o de regulación distribuida, es decir, aplicar los criterios en cada predio y área común a pequeña escala, controlando el problema en la fuente con volúmenes de agua bajos, en vez de adoptar la estrategia del modelo tradicional centralizado de manejo de escorrentía con volúmenes acumulados (Prince George, County of, 1999).

Esto parece tener mucho sentido hasta que se revisa la factibilidad de aplicar este método a las lógicas económicas, culturales y sociales locales. Por mencionar una diferencia sustancial: el tamaño promedio de los predios y de las viviendas es notoriamente menor en México. Mientras menor es este, la proporción de áreas verdes se vuelve mucho menor, pues las dimensiones mínimas de estacionamiento y patio de servicio son fijas. Las dimensiones de los predios y viviendas para sectores económicos bajo y medio generan porcentajes muy altos de superficies impermeables. En la figura 38, se muestra una comparativa. Las tres primeras viviendas de izquierda a derecha son lotes tipo en México. El lote de la derecha corresponde a un “lote típico” de un acre (~400 m<sup>2</sup>) trabajado con Low Impact Development.

Con poca área permeable por vivienda, las alternativas de manejo pluvial se reducen y los volúmenes de agua se vuelven difíciles de manejar. Si esto no se resuelve en su totalidad a la escala de vivienda, debiera de ser resuelto en las áreas comunes tales como vialidades y áreas verdes. Además las áreas de donación debieran ser destinadas a infiltrar, retener y almacenar agua de lluvia. De todas formas, habría que revisar si las dimensiones mínimas exigidas son suficientes para este propósito.



**Figura 47.** Comparativa entre tipologías de vivienda regional de interés bajo y medio con tipología estadounidense.  
Fuente: integración de material de elaboración propia con recorte de Low Impact Development Design Strategies (Prince George, County of, 1999).

Como se discutió anteriormente, las dimensiones de los lotes de la mayoría de las viviendas son tales que la proporción de área impermeable es insuficiente para alcanzar a cubrir con los objetivos hidrológicos. Aquellas que cuentan con el espacio suficiente podrían aplicar la metodología LID.

### 8.3.2 Ecotecnias

De forma alternativa, el Reglamento de Zonificación del Estado de Jalisco obliga la construcción de un pozo de absorción que reciba los escurrimientos pluviales provenientes de azotea y terraza con capacidad adecuada a los escurrimientos esperados para su infiltración al subsuelo. Lo que no se contempla son las diferentes capacidades de absorción que pudiera tener el suelo en cuestión y la introducción de un sistema de filtrado que evite la contaminación del subsuelo.

Con el fin de que la vivienda contribuya en el manejo del agua pluvial, existen otras medidas que podrían realizarse a escala de la vivienda. Una de ellas es el almacenamiento del agua de lluvia que escurra por techos y cubiertas, aunque antes de exigirse debiera ser validada en términos de efectividad y viabilidad ya que existen testimonios opuestos al respecto. A favor, el Ing. Eduardo

León Garza con su sistema SIASA-0 (León-Garza, Eduardo, 2006), con argumentos en contra de su viabilidad económica el Arq. Óscar Castro.

En caso de que el almacenamiento no pudiera hacerse al interior de la vivienda debería exigirse que estas viviendas cuenten con dos salidas separadas, una de agua de lluvia y otra de aguas residuales. Un paso más allá sería que estas tuvieran dos circuitos: uno para aquellos muebles y salidas que requieran agua de la mayor calidad por su posible ingestión y un segundo para el resto abriendo la posibilidad a emplear tanto agua de lluvia sin ningún tratamiento como aguas grises.

## 9. Conclusiones

Los objetivos de este trabajo son:

1. Presentar indicadores, metodologías, herramientas de análisis, criterios de diseño y estrategias de acción que puedan servir de base para un modelo alternativo de planeación urbana que considere los recursos hídricos del territorio y los fenómenos hidrológicos que suceden en él, así como responsable en su consumo, utilización y disposición.
- 2- Diseñar estrategias que se traduzcan en mejorar las condiciones hidrológicas y sociales de la microcuenca del Guayabo

Las principales conclusiones respecto de ambos objetivos son:

Para lograr un modelo de planeación que integre los recursos hídricos y los fenómenos hidrológicos que suceden en él, es necesario definir objetivos y estrategias para las distintas escalas de planeación y desarrollo del territorio. Las escalas que para los fines de este trabajo se encontraron como las más adecuadas son:

Escala regional / cuenca

Escala distrital / sub-cuenca o microcuenca

Escala barrial

Escala del predio.

Esta distribución en escalas permite relacionar el comportamiento hidrológico original, las condiciones del suelo y las características de la lluvia propias del lugar. Estos objetivos se definirán de forma que preserven el funcionamiento hidrológico y permitan el desarrollo urbano.

Los objetivos hidrológicos medibles por tanto pueden ser utilizados como herramienta de la planeación urbana la definición de objetivos hidrológicos medibles para las distintas escalas del territorio (predio, vecindario, barrio, distrito/microcuenca, subcuenca, región, etc.,).

Conservar el comportamiento hidrológico que tenía el lugar en condiciones naturales implica preservar los volúmenes de infiltración y evaporación así como mantener los caudales pico y tiempos de concentración. Como beneficio se logra evitar inundaciones y daños cada temporal de lluvias y se preserva la calidad del agua.

La forma natural de dividir el territorio en relación al agua superficial es en cuencas hidrológicas. La organización del territorio de esta forma facilita la administración de los recursos hídricos, permite comprender el funcionamiento hidrológico previo al desarrollo y simplifica la tarea de preservar el funcionamiento original sin detener el desarrollo urbano.

Esta subdivisión trasciende los sistemas hidrológicos. Los subsistemas naturales, dependientes del agua, se encuentran ligados a los sistemas hidrológicos. Incluso los sistemas humanos tienen relación con el agua: históricamente, el desarrollo socioeconómico ha estado ligado a los subsistemas naturales y en consecuencia a los hidrológicos. Esto es más evidente en los ámbitos rurales.

Por otro lado, las divisiones políticas no suelen corresponder a los límites físicos de los sistemas y subsistemas propios del territorio. Al adoptar esta división se secciona de forma artificial estos sistemas, lo que resultará en una visión incompleta de las consecuencias de las acciones llevadas a cabo al interior del territorio y de las causas cuando estas tengan su origen en el exterior.

En el caso de la subcuenca del Guayabo, se encontró que la división política no tiene relación alguna con los límites de la cuenca. En buena medida, los límites municipales y distritales están definidos por vialidades o límites de predios. Esto no permite una planeación y gestión adecuada de los recursos hídricos. Para corregir esta dificultad es necesario dividir el territorio de acuerdo a los límites de la subcuenca o con base en otra unidad hidrológica que preserve las propiedades de cuenca.

La cantidad de agua de lluvia disponible es una variable relevante en la definición de los límites de crecimiento de un territorio. Para un desarrollo sustentable, la disponibilidad de agua dulce es vital. Las aguas subterráneas sólo debieran ser explotadas en la medida que se garantice una tasa de extracción inferior a la tasa de regeneración, de otra forma en algún momento se agotarían. El agua de lluvia es una fuente alternativa de agua dulce y mientras el clima de la región no se altere, podría considerarse como un recurso renovable dentro de los límites de precipitación del lugar.

La fuente principal de abasto de agua potable en la subcuenca del Guayabo es subterránea y esta está próxima a agotarse. Por otro lado, el clima de la región es subhúmedo, lo cual indica que las precipitaciones anuales son moderadas (883.5 mm en promedio). En la subcuenca las lluvias anuales en promedio representan más de 67 millones de m<sup>3</sup>. Si se aprovecha la décima parte, se podría abastecer a 100,000 habitantes durante todo el año.

Con base en lo anterior, se estima que la población máxima que la subcuenca del Guayabo pudiera albergar es de 120,000 habitantes con una dotación promedio de 150 litros diarios si se lograra almacenar el 10% del volumen de lluvia, es decir 6.78 millones de metros cúbicos.

La definición de áreas de Protección a Acuíferos del Reglamento de Zonificación del Estado es insuficiente en la protección de zonas de recarga, ya que se restringen únicamente edificaciones que no cuenten con drenaje canalizado, usos de alta densidad e instalaciones que manejen sustancias que puedan contaminar el subsuelo. En Alemania, se restringe cualquier otro uso, incluso recreativo, para evitar cualquier posible contaminación del agua. Por ahora, el reglamento al menos debería prohibir la edificación en estas zonas. De igual forma se detecta una limitación en la definición de cauces federales en la Ley de Aguas Nacionales que ignora que las secciones de ríos y arroyos son menores aguas arriba cuando llevan más velocidad. Para proteger la calidad de las aguas, es necesario cuidar los cuerpos de agua desde su origen.

Es importante mencionar que el esquema administrativo del país complica la protección y administración del territorio y los recursos de este. La nación es propietaria de los cauces y cuerpos de agua así como las aguas subterráneas, pero confía al municipio su administración. El ayuntamiento tiene la facultad para autorizar las edificaciones dentro del territorio y la obligación de dotar servicios a la población, sin embargo sus ingresos son muy limitados: la recaudación fiscal es federal, una parte de este le corresponderá al estado y este lo distribuirá a los municipios.

A partir de información geográfica y la solución analítica a la ecuación de Laplace para el flujo de agua subterráneo encontrada por Tóth, se pueden definir a priori áreas potenciales de recarga en los puntos más altos. A su vez, se espera que los mínimos locales y regionales sean zonas de descarga. Posteriormente esto podrá ser corroborado con sondeos en campo.

Con base en esos criterios, las zonas de recarga en la subcuenca del Guayabo corresponden al Bosque de la Primavera y al cerro de Las Latillas. Existen alrededor de 3,000 hectáreas sin urbanizar con estas características que debieran ser destinadas para recarga de acuíferos.

Algunas zonas de descarga se esperarían entre los cerros del bosque como mínimos locales. Dado que la subcuenca del Guayabo es de tipo cabecera –captación, las zonas más bajas podrían no ser zonas de descarga. Una zona de descarga regional está identificada en Toluquilla. El acuífero de Toluquilla se alimenta del agua que se infiltra en la Primavera.

Sin embargo se observa la proliferación de fraccionamientos y cotos en las áreas adyacentes a las colinas y montañas del Bosque de la Primavera. En esta zona hay una alta densidad de cauces que descienden del bosque y que han sido desviados, canalizados o entubados durante el proceso de urbanización, lo cual sólo resuelve el problema en el corto plazo y traslada el problema a otro lugar. Coincidentemente estas zonas son las más propicias para infiltrar y captar el agua de lluvia y son cruciales para un plan de recuperación de la función hidrológica de la subcuenca por lo que ya no debería haber nuevas edificaciones en esta parte de la subcuenca.

Por otro lado, con el fin de prevenir pérdidas materiales y humanas conviene considerar zonas de riesgo por inundación y zonas de riesgo por desbordamiento y arrastre. Las zonas de inundación debieran de identificarse en primer lugar por la observación del funcionamiento hidrológico natural: el sistema hidrológico después de la urbanización tenderá a comportarse de la misma manera. Las curvas de nivel con el auxilio de herramientas de procesamiento de información geográfica de igual forma pueden ayudar a detectar puntos donde se pudiera acumular el agua en vez de escurrir. Existen cálculos especializados para determinar las láminas de agua en avenidas máximas para un periodo de retorno definido. Por otro lado, se debe revisar la existencia de obstáculos a los escurrimientos de origen artificial y su efecto ante un evento pluvial máximo.

Se identificaron como zonas con riesgo por inundación aquellas áreas contiguas al cauce y cercanas a la parte baja de la subcuenca. Los cálculos de láminas de agua e incluso las fotografías aéreas muestran que durante eventos pluviales fuertes, el agua puede llegar a aumentar su amplitud de forma considerable en estos puntos. En la visita de campo, se encontró que



justamente los predios adyacentes al cauce principal localizados en esta zona reciben escombros para relleno. Existe el riesgo de que ante una crecida por una avenida máxima, las aguas se desborden con posibles afectaciones para los asentamientos que invadan el cauce original y sus habitantes.

Con el propósito de definir las zonas de riesgo por arrastre y desbordamiento se propuso caracterizar los arroyos y ríos en sus diferentes segmentos en cuanto a pendiente media, área de sección, tiempo de concentración, caudal pico y volumen drenado para distintas tormentas de diseño. Estas variables sirven para revisar capacidades de los cauces, así como puntos de riesgos por desbordamiento y arrastre.

Siguiendo la metodología propuesta, se identificaron segmentos y afluentes del arroyo la Culebra que ante una lluvia de 37.5 mm sus caudales son tales que podrían representar un peligro para las personas que intentaran cruzarlos. Dado que las áreas de sección en diferentes puntos de los cauces eran desconocidas no fue posible definir bajo que magnitud de tormentas la capacidad del cauce se vería sobrepasada y resultaría en un desbordamiento.

Para tener margen de acción se requiere contar con superficie disponible para desazolver, filtrar, almacenar y conducir el agua de lluvia. Para este propósito se proponen las zonas de reserva para el manejo de aguas pluviales. Se identificaron alrededor de 1000 hectáreas que podrían ser adoptadas para estos fines.

Se calculó un reservorio de agua de lluvia y el flujo de agua a lo largo del año. Requiere de una superficie de 1.9 hectáreas para almacenar los 275 mil metros cúbicos de agua pluvial que representan el 10% de las lluvias recuperadas por uno de los afluentes del arroyo la Culebra. Con esta agua se garantiza el abasto de 5900 personas. A partir de este análisis se estima que para almacenar un volumen equivalente al 10% de la lluvia que cae sobre la subcuenca ( $6.78 \text{ Mm}^3$ ) se requerirían entre 50 y 100 hectáreas dependiendo de la profundidad de los embalses. El resto de la superficies de reserva para manejo de aguas pluviales se emplearía en conducción, retención temporal, tratamiento y en zonas de amortiguamiento.

Entre el cerro de la Campana y el cerro de las Planillas podría crear un reservorio para el arroyo de la Culebra. Existen áreas no urbanizadas aguas abajo, entre el cerro de la Campana y la carretera a San Isidro que podrían servir para el mismo propósito aunque en este caso no se podría aprovechar la topografía para reducir los costos. En todo caso, ambos tienen la ventaja de estar ubicados cerca de la fuente de los escurrimientos y corren menos riesgos de ser contaminados. Además se puede aprovechar la gravedad para la distribución de esta agua a las viviendas ubicadas en un nivel más bajo.

En la visita de campo se detectó que las presas del Guayabo y el Molino han desaparecido como tales, la mayor parte de la superficie está cubierta por vegetación aunque también se observan ladrilleras y asentamientos irregulares dentro de su perímetro. Es probable que las presas se

hayan azolvado con el material arrastrado por las lluvias y no se haya realizado el mantenimiento necesario. Para su utilización como reservorios de agua potable, aparte de requerir de un saneamiento de los cauces, se deberá de contar con mecanismos de cribado y filtrado que reduzcan la cantidad de sedimentos que pudieran llegar a depositar. Además haría falta monitorear la cantidad y calidad d agua retenida y vigilar que se respeten sus límites.

Se hizo uso de los valores de infiltración de la subcuenca del Guayabo en condiciones originales para tener un punto de referencia en la definición de un objetivo hidrológico realista. Este se estimó en 82%. Esto se debe a que la mayor parte de la superficie de la subcuenca tiene pendientes mayores al 5%, incluso el 32% de las superficies tienen pendientes mayores al 25%. Estos datos ya indican una condición hidrológica original con mayores retos para la urbanización por los volúmenes esperados de esorrentía (15-18%) y tiempos de concentración relativamente cortos debido a la pendiente.

Actualmente las áreas urbanizadas comprenden 3,500 hectareas. Estas áreas impermeables son responsables del incremento de la proporción de esorrentía. Al año estos representan más del 40% de las precipitaciones, es decir, más de 27 millones de metros cúbicos en promedio.

El trazo de las vialidades también tiene efecto en la hidrología posterior al desarrollo. Las calles paralelas a la dirección natural de escurrimiento ayudan a conducir esta agua a las partes más bajas. La presencia de topes y la interrupción o desvío de estas vialidades se convierten en obstáculos al flujo de agua lo que resulta en el mejor de los casos en inundaciones locales. Afectaciones importantes al flujo de los vehículos pueden ocurrir cuando estos escurrimientos desembocan en vialidades principales que corren perpendiculares a estos escurrimientos. Tal es el caso de la avenida López Mateos que requiere de colectores en todos los cruces para evitar que esta se inunde.

Regular la densidad de la edificación con base en los objetivos hidrológicos de la subcuenca del Guayabo implica dejar una proporción importante de la superficie de la subcuenca como áreas permeables. De haber seguido esta política para regular la densidad del territorio hubiera implicado que los tamaños de predios aumentaran mientras el porcentaje de ocupación del suelo se redujera a valores menores a 0.5 garantizando la permeabilidad del territorio restante. Una alternativa para cumplir con estos requisitos y poder aumentar la densidad de habitantes sería que la vivienda fuera vertical.

Tanto el Low Impact Development como el Integrated Water Management proponen atacar el problema del manejo de agua de lluvia de forma distribuida en la pequeña escala argumentando mayor eficiencia que los esquemas centralizados. Lamentablemente esto no puede realizarse de forma generalizada localmente, dado que el tamaño de los predios y la proporción empleada para el desplante de la vivienda (COS) resulta en superficies permeables insuficientes. Por tal razón, una estrategia que implique acciones en las distintas escalas y conjunte tanto acciones centralizadas como distribuidas podría ser una alternativa más adecuada para esta región.

Por lo anterior es necesario que a una escala intermedia, los desarrolladores realicen una planeación del sitio que reduzca las afectaciones a la hidrología que pudieran generar en su escala e introducir elementos para mitigarlos, tales como los IMPs o SuDS, de tal forma que cumplan con los objetivos hidrológicos correspondientes.

De forma adicional se requiere de aplicación de técnicas para retardar los escurrimientos, incrementar la capacidad de infiltración y retención, así como disminuir la proporción de áreas impermeables y desconectarlas entre sí en las áreas públicas y como parte de la infraestructura urbana. En este sentido, las SuDS proveen soluciones apropiadas ya que fueron pensadas precisamente para realizar estas funciones, con la ventaja de ser más económicas que las soluciones hidráulicas convencionales y de que se pueden integrar al paisaje.

En la escala de la vivienda las mayores contribuciones podrían lograrse mediante un consumo eficiente y responsable del agua y la aplicación de ecotecnias para aprovechar el agua pluvial y reutilizar las aguas grises. Una azotea de 100 m<sup>2</sup> ubicada en la subcuenca recibe más de 88 m<sup>3</sup> al año, lo cual es aproximadamente la cuarta parte de la demanda de una familia de 4 integrantes en todo el año.

Políticas regionales como la creación de pozos de absorción deben revisarse para que se adapten a las capacidades particulares del suelo del sitio y controlar la calidad del agua que se conduce para evitar la contaminación del subsuelo.

## 10. Recomendaciones

De forma complementaria a una planeación urbana que considere las aguas superficiales y a las acciones correctivas, es necesaria la implementación de políticas para reducción de la demanda tales como cambio de hábitos e implementación de sistemas ahorradores, reutilización de agua y captación descentralizada de agua pluvial.

Se sugiere instalar instrumentos de medición que permitan refinar los modelos racionales empleados inicialmente y que permitan obtener retroalimentación sobre las medidas implementadas.

Sería conveniente poder definir un criterio de riesgo de acuerdo al caudal o gasto de una corriente. Así como actualmente hay criterios que relacionan la velocidad de la corriente y el calado en cuanto al riesgo de arrastre de personas, sería útil asociar las variables hidrológicas a la capacidad destructiva del agua. Habría que revisar con un especialista si la intensidad de lluvia utilizada en los cálculos hidrológicos se puede equiparar a una intensidad de lluvia real. De ser así, ya existen clasificaciones de riesgo definidas por protección civil de España para la intensidad de las lluvias. En dicha clasificación, de 15-30 mm/h se considera fuerte, de 30 a 60 mm/h muy fuerte y torrencial a mayores intensidades.

Para completar las zonas de riesgo por desbordamiento, hace falta capturar los diferentes valores de secciones de los cauces ya que de conocerse, se puede determinar si una tormenta es de magnitud tal que el caudal generado sea superior a la capacidad del cauce.

Con el propósito de aumentar las contribuciones individuales de las viviendas en cuanto a la recuperación del funcionamiento hidrológico de la cuenca y el aprovechamiento de agua pluvial, valdría la pena realizar un estudio de factibilidad de captación y almacenamiento de lluvia de forma doméstica.

En cuanto a las prácticas de construcción, actualmente no se exige que durante la construcción se tomen medidas para que el viento y la lluvia no transporten los materiales utilizados en la obra. Tampoco se regula la disposición de agua contaminada por los materiales empleados en la construcción ni existe un método establecido para limpiar el herramental que requiriera menor cantidad de agua.

Con base en los hallazgos de la investigación reportados y en sintonía con el desarrollo urbano basado en la hidrología, se las siguientes acciones prioritarias para mejorar el metabolismo hídrico de la subcuenca:

- 1) Identificación de zonas de riesgo por inundación, desbordamiento y arrastre en los puntos identificados.

- 2) Captación y almacenamiento de agua pluvial de los escurrimientos provenientes del Bosque de la Primavera antes de que esta agua pudiera ser contaminada con basura, aceites, drenajes, etc., a su paso por asentamientos humanos.
- 3) Separación aguas negras de aguas pluviales en todos los cauces, de forma que el agua que llegue a los distintos reservorios y a la Presa del Guayabo sea exclusivamente agua pluvial. Esta es una condición indispensable para hacer posible un buen manejo hídrico de la cuenca. La forma de atacar este problema es por afluentes y en sentido descendente.
- 4) Reforestación en los puntos altos para retardar escurrimientos de lluvia y detener erosión. Reforestación en las zonas bajas y/o planas como medida para la reducción del efecto de “plancha de calor” y regulación de temperatura y humedad a través de la evapotranspiración de la capa vegetal.
- 5) Reducción de áreas impermeables e introducción de SuDS e IMPs para reducir la escorrentía.
- 6) Tratamiento de las aguas residuales para su reutilización.
- 7) Una vez que el abasto haya sido sustituido con agua pluvial, revocar las concesiones de extracción y establecer mecanismos de monitoreo que permitieran detectar extracciones clandestinas.
- 8) Protección a áreas de recarga/infiltración con el fin de restablecer los acuíferos y garantizar la pureza del agua almacenada. Cabe señalar que es más económico almacenar el agua en el subsuelo y si se toman las medidas necesarias, podría ser fácil asegurar su calidad.
- 9) Protección de manantiales y ojos de agua en las zonas bajas para mantener un caudal mínimo de calidad que mantenga el hábitat.

El cauce principal mantiene inesperadamente una población de peces y garzas aún fuera de temporada de lluvia. En varios puntos se observó que el arroyo tiene belleza y que de preservar la calidad de agua podría convertirse en una zona de recreación.

## 11. Índice de Tablas

Tabla 1. Abasto de agua potable suministrado por el SIAPA durante el 2014 a la Zona Metropolitana de Guadalajara.....	7
Tabla 2. Fuentes de abasto de la Zona Conurbada de Guadalajara.....	8
Tabla 3 Extracción vs Recarga anual de los acuíferos de la ZMG.....	9
Tabla 4. Grupos hidrológicos de suelo con sus capacidades de infiltración.....	44
Tabla 5. Tasa de infiltración instantánea y volumen paramétrico infiltrado por tipo de suelo.....	45
Tabla 6. Índices de escurrimiento según uso de suelo.....	46
Tabla 7. Listado de diferentes criterios de riesgo de calado máximo.....	49
Tabla 8 Listado de diferentes criterios de riesgo de velocidad de la corriente máxima.....	49
Tabla 9. Listado de diferentes criterios de riesgo de velocidad de la corriente máxima.....	50
Tabla 10. Esquema explicativo del desarrollo de la investigación.....	65
Tabla 11. Características básicas de las distintas categorías que integran un centro urbano de acuerdo al Reglamento Estatal de Zonificación de Jalisco.....	69
Tabla 12. Alternativas de zonificación al modelo dominante.....	73
Tabla 13. Segmentos y afluentes del arroyo la Culebra de potencial riesgo para la población ante una tormenta del percentil 95 (37.5 mm). ....	84
Tabla 14. Relación de superficies de acuerdo a la zonificación propuesta.....	87
Tabla 15. Distribución de precipitaciones diarias de Guadalajara (DGE 1982-2011).....	88
Tabla 16. Estimación de la infiltración de la subcuenca del Guayabo en condiciones originales.....	89
Tabla 17. Estimación de la infiltración de la subcuenca del Guayabo bajo las condiciones actuales.....	90
Tabla 18. Análisis de flujo de agua almacenada para el reservorio planteado.....	94
Tabla 19. Tabla que reúne la precipitación mensual, la evapotranspiración potencial (ETP) y la evaporación esperada.....	96
Tabla 20. Flujo de agua en el reservorio considerando pérdidas esperadas por evaporación, un consumo hipotético.....	96
Tabla 21. Relación del arbolado y la pendiente del área analizada con la introducción de cotas verdes.....	99
Tabla 22. Variables hidrológicas del arroyo La Culebra y sus afluentes inmediatos.....	130
Tabla 23. Tabla de variables hidrológicas de la red de afluentes del Arroyo la Culebra.....	131
Tabla 24. Precipitación media, mensual y anual en Tlajomulco de Zuñiga.....	135
Tabla 25. Normales climáticas de la estación meteorológica de Tlajomulco (cabecera municipal).....	136
Tabla 26. Precipitación anual registrada entre 1974 y 2006 por la estación meteorológica de Tlajomulco..	137
Tabla 27. Balance hídrico del municipio de Tlajomulco de Zuñiga.....	141
Tabla 28. Definición de variables del balance hídrico para temporal de lluvias y de secas.....	142



## 12. Índice de Gráficas

Figura 1. Balance de agua en el lago de Chapala en 1995. ....	9
Figura 2. Ubicación de puntos de inundación identificados por el SIAPA. ....	11
Figura 3. Modificaciones al funcionamiento del sistema hidrológico del territorio bajo distintos grados de urbanización. ....	12
Figura 4. Región Lerma-Santiago y las regiones hidrográficas de México. ....	16
Figura 5. Cuenca Santiago-Guadalajara (RH12E) en relación a la división política municipal del Estado de Jalisco. ....	16
Figura 6. División de cuencas y subcuencas hidrográficas alrededor de la Zona Metropolitana de Guadalajara. ....	17
Figura 7. La Cuenca del Ahogado y su intersección con los límites municipales. ....	18
Figura 8. La Cuenca del Ahogado y la región del Valle de Atemajac. ....	19
Figura 9. División en subcuencas de la Cuenca del Ahogado. ....	20
Figura 10 La subcuenca del Guayabo y límites municipales. ....	21
Figura 11. Microcuencas de la subcuenca del Guayabo: “La Culebra – Colorado” y “Arroyo Seco – San Juanate”. ....	22
Figura 12 . Relieve e hidrología del Guayabo. ....	23
Figura 13. Perfil de elevación del cauce principal de la subcuenca El Guayabo. ....	24
Figura 14 Plano de pendientes de la subcuenca El Guayabo. ....	24
Figura 15. Trazo urbana, localidades y vialidades principales de la subcuenca del Guayabo. ....	25
Figura 16. Variables demográficas relativas a bienes y servicios que no son de primera necesidad. ....	26
Figura 17. Variables demográficas relativas a la educación. ....	27
Figura 18. Identificación de la expansión urbana en la subcuenca del Guayabo por contraste entre la traza urbana registrada en las bases de datos de INEGI con fotografías aéreas más recientes. ....	27
Figura 19. Ejemplo de gráfica de distribución estadística de precipitación por percentiles. ....	43
Figura 20. Gráfica que compara los hidrogramas de un territorio bajo condiciones normales con este posterior a su urbanización y con la implementación de medidas de planeación LID. ....	53
Figura 21. Comparación de hidrogramas de un territorio entre el funcionamiento hidrológico natural original, el territorio urbanizado con controles BMP y urbanizado con conceptos de LID y empleando IMPs. ....	53
Figura 22. Diferentes métodos ordinales de clasificación de afluentes. ....	62
Figura 23. Límites municipales y Distritos Urbanos de Tlajomulco en relación a la subcuenca del Guayabo. ....	66
Figura 24. PMDU Tlajomulco, acercamiento al área de estudio con límites distritales. ....	67
Figura 25. Flujo de agua subterránea y sistemas locales, intermedios y regionales. ....	77
Figura 26. Uso de suelo oficial de acuerdo con planes parciales de Tlajomulco, Zapopan y Tlaquepaque. ....	81
Figura 27. Zonas con potencial para almacenamiento de agua pluvial en la parte baja de la subcuenca. ....	82
Figura 28. Revisión de Planes Parciales de Tlajomulco para definir con mayor precisión las áreas de uso agrícola susceptibles a convertirse en reservorios en la parte baja de la subcuenca. ....	82
Figura 29. Zonas consideradas ideales para la infiltración en la parte alta de la subcuenca del Guayabo. ....	83
Figura 30. Zonas potenciales de infiltración considerando el plan parcial vigente. ....	83
Figura 31. Lámina de agua con periodo de retorno de 25 años. ....	84
Figura 32. Mapa de riesgos por desbordamiento y arrastre correspondientes al área tributaria al Arroyo de la Culebra. ....	85
Figura 33. Zonificación propuesta para la subcuenca del Guayabo. ....	86
Figura 35. Plano de unidades de escurrimiento en la subcuenca del Guayabo. ....	92

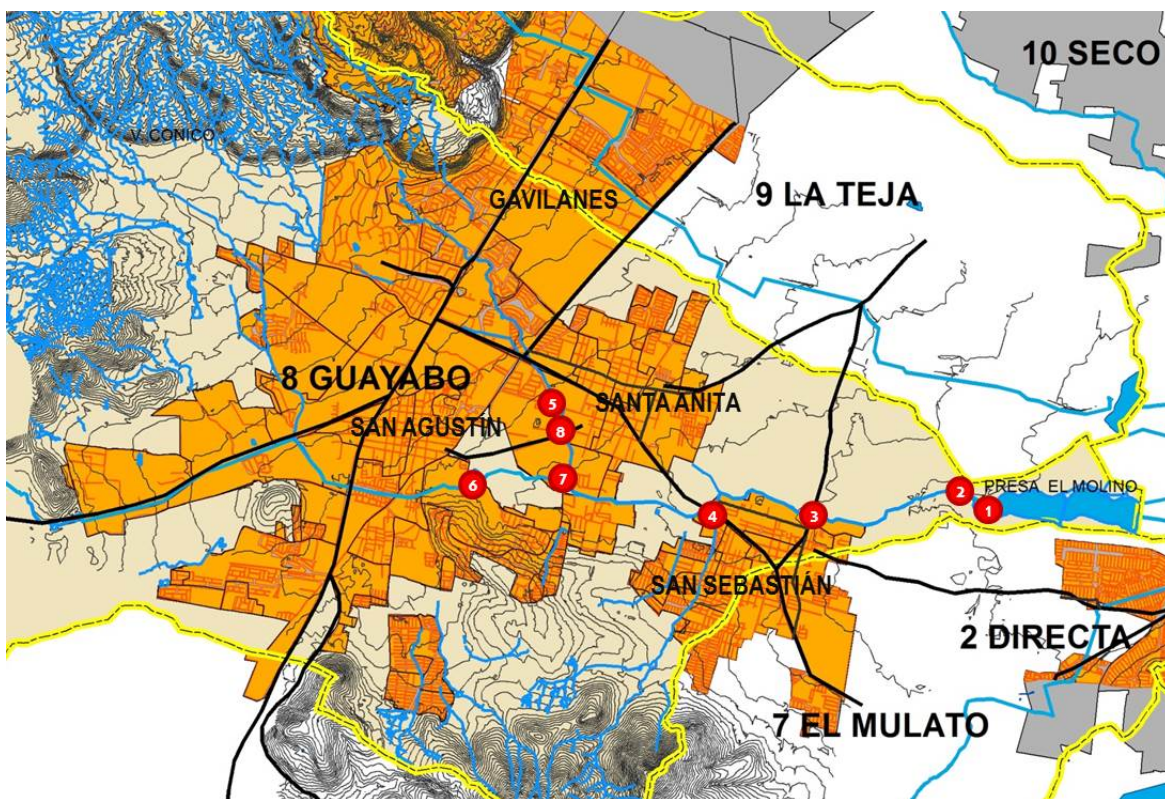
Figura 36. Volumen teórico anual de agua concentrada del arroyo La Culebra, sus principales afluentes y subafluentes con un coeficiente de escurrimiento de 0.10.....	93
Figura 37. Hidrograma donde se contrasta la captación de agua pluvial mensual estimada a lo largo del año contra el consumo mensual supuesto (demanda constante) .....	94
Figura 38. Hidrograma donde se muestra la variación en volumen de agua disponible en el reservorio en conjunto con el volumen acumulado de agua pluvial captada y el volumen acumulado de consumo. ....	95
Figura 39. Hidrograma donde se contrasta la captación de agua pluvial mensual estimada a lo largo del año contra el consumo mensual supuesto (demanda constante) y la evaporación estimada. ....	97
Figura 40. Acercamiento a la parte inferior del hidrograma anterior para apreciar la magnitud de la evaporación. ....	97
Figura 41. Ejemplo de cotas verdes en el territorio paralelas a las curvas de nivel.....	99
Figura 43. Localización recomendada de cunetas verdes. Vista en planta.....	102
Figura 44. Implementación de una cuneta verde con diseño en una calle residencial.....	103
Figura 45. Diagrama explicativo de una franja verde (filter strip o buffer strip).....	103
Figura 46. Corte esquemático de un jardín de lluvia. ....	104
Figura 47. Localización de jardines de lluvia y pavimentos permeables en calle comercial de alto tránsito. Vista en planta de calle. ....	104
Figura 48. Impermeabilidad y patrones de trazo de vialidades.....	107
Figura 49. Comparativa entre tipologías de vivienda regional de interés bajo y medio con tipología estadounidense. ....	109
Figura 50. Recorrido crítico por la parte baja de la subcuenca del Guayabo. ....	122
Figura 51 Plano de la parte alta de la subcuenca del Guayabo, traza urbana de acuerdo a INEGI e hidrografía de CEA.....	125
Figura 52 Área de escurrimiento para el arroyo los Gavilanes.....	126
Figura 53 Recorte del Plan Parcial del Distrito Urbano 3 de Tlajomulco “El Palomar”.....	126
Figura 54 Recorte del Plan Parcial del Distrito Urbano 3 de Tlajomulco “El Palomar” con acercamiento al límite norponiente del distrito. ....	127
Figura 55 Imagen satelital de la urbanización registrada a lo largo del Boulevard Bosques de Santa Anita. ....	127
Figura 56. Denominación de principales fluentes y cauce principal de la subcuenca del Guayabo. ....	129
Figura 57. Esquema jerárquico de afluentes de la subcuenca del Guayabo utilizando la nomenclatura propuesta. ....	129
Figura 58. Esquema jerárquico de afluentes de la subcuenca del Guayabo utilizando la nomenclatura simplificada. ....	129
Figura 59 Clasificación de afluentes tributarios del Arroyo la Culebra.....	130
Figura 60 Diagrama jerárquico de la red simplificada del arroyo la Culebra. ....	130
Figura 61. Mapa de clasificación climática del municipio de Tlajomulco de acuerdo a Köppen. ....	133
Figura 62. Simbología del mapa previo. Se anexa de esta forma por legibilidad.....	133
Figura 63. Variación de temperatura máxima, media y mínima mes con mes en el municipio de Tlajomulco de Zuñiga.....	134
Figura 64. Mapa de temperatura media anual del municipio de Tlajomulco de Zuñiga.....	134
Figura 65. Mapa de precipitación media anual del municipio de Tlajomulco de Zuñiga. ....	135
Figura 66. Distribución estadística de las precipitaciones anuales registradas entre 1974 y 2006 por la estación meteorológica de Tlajomulco.....	138
Figura 67. Distribución t e intervalos de confianza. ....	138

Figura 68. Balance hídrico en Tlajomulco de Zuñiga utilizando el método de Thornthwaite, siendo ETP la evapo-transpiración potencial, ETR la evapo-transpiración real y P la precipitación..... 141

## 13. Anexos

### 13.1 Observaciones del recorrido crítico

Para un primer recorrido con un carácter más bien exploratorio se escogió recorrer el curso principal del Arroyo el Guayabo en el sentido contrario a la corriente, partiendo de la salida de la subcuenca en la Presa el Guayabo ( punto 1 de la ruta mostrada), y remontando aguas arriba hasta el punto donde se le conoce como San Juanate, cerca de donde había un ojo de agua ( punto 6); así como un pequeño tramo de uno de los principales afluentes a su paso por Santa Anita: el Arroyo Seco (5 y 8). Se buscaba responder las preguntas: ¿Con qué calidad sale el agua de la subcuenca? ¿En qué estado está la presa? Si los arroyos son de temporal ¿existe un flujo presente? ¿Presenta características de arroyo natural? ¿Qué relación se podría observar de la población con el cauce?



**Figura 48.** Recorrido crítico por la parte baja de la subcuenca del Guayabo.  
Fuente: elaboración propia.

Antes de realizar el recorrido se estudiaron imágenes satélites para rastrear el curso principal del río y determinar la ruta de navegación que pasara por puntos críticos. Se ubicaron puntos de interés tales como la desembocadura del arroyo del Guayabo a la presa del Guayabo (1), la cortina de la presa y la transición a la presa del Molino, puentes vehiculares sobre el arroyo tales como 8 de julio (1), Av. Cuauhtémoc (3), Juárez Poniente (4), Madero (5), Camino a la Coladera (7), 5 de mayo (8) etc., en su paso por localidades como San Sebastián el Grande (3, 4) y Santa Anita (5 y 8) o a través de zonas agrícolas (7). De igual forma, se consideró observar el entronque con otros afluentes, tal como el arroyo que desciende del Cerro las Latillas (4), o con el Arroyo Seco (7) y visitar el ojo de agua (6).

Los registros de este recorrido en forma de listas de cotejo (que incluyen algunas notas de campo) y el registro fotográfico se presentan en la sección de anexos.

Entre las observaciones encontradas, se pueden señalar las siguientes:

#### **Presa del Guayabo**

- La incorporación del arroyo el Guayabo a la presa del mismo nombre parece haberse desviado durante las obras de prolongación y pavimentación de la Av. 8 de Julio.
- No se aprecia un cuerpo de agua en el área de la presa; más bien parece una continuación del arroyo. El resto del área está cubierta por vegetación espesa, por lo que parece que el agua no cubre todo el polígono más que por periodos breves, si acaso.
- Existen ladrilleras y posibles asentamientos ilegales en el polígono de la presa
- Se pueden encontrar escombros y basura a las orillas de la corriente que circula por el área de la presa.
- El agua está contaminada con aguas negras. Esto es perceptible por el olor y color del agua.
- Es complicado acceder a otros puntos de la presa. Los únicos puntos de acceso son desde 8 de julio y no llegan a la cortina de la primera presa. No fue posible recorrer el polígono más allá de 300m de 8 de julio.
- Existe una población de garzas. Fueron vistas paradas en el curso del río.

#### **Calle Rastro (de 8 de Julio hacia San Sebastián)**

- A 100m o menos de 8 de julio se puede observar letreros que solicitan escombros para rellenar. A pie de la calle se observa que el terreno se ha ido rellenando en dirección al arroyo en un terreno libre de una hectárea aproximadamente. Ya ha sido rellenado alrededor de la mitad de éste.

#### **Puente de Av. Cuauhtémoc al ingreso de San Sebastián el Grande**

- De un lado se ve que viene la corriente a una velocidad baja, el agua no es nítida pero se observan plantas y árboles que suelen vivir a las orillas de los ríos. También se observa una garza dentro del agua.
- Debajo del puente existe un regulador de flujo. El agua que pasa genera espuma.
- Del otro lado se observa un cauce totalmente distinto. Profundo, lleno de basura, agreste.
- Se observa un desagüe de aguas negras descargando de forma continua.
- En la orilla de San Sebastián, existen muros de contención y casas hasta la orilla.

#### **Juárez Poniente, en la salida a Santa Anita**

- Existen dos cauces separados apenas por 50m. Uno de ellos es el cauce principal del arroyo del Guayabo, el segundo es un arroyo pequeño cuya corriente va de sur a norte, proveniente del Cerro de las Latillas. Estas dos corrientes se unen a 50m de la calle.
- El arroyo el Guayabo cuenta con un cauce amplio. Se han realizado obras civiles para reforzar las paredes del cauce y para retardar el flujo. Se observa una bolsa de basura tirada bajo el puente. Antes del puente, el cauce es amplio y está bordeado por árboles. Sin embargo el agua tiene un mal olor, no muy penetrante.
- El arroyo más pequeño llega entubado y es expuesto bajo el puente. El caudal es chico y se observan peces pequeños. Se puede observar el lecho del arroyo. El agua es más clara que en los otros puntos observados.

#### **Arroyo Seco a su paso por Santa Anita**

- Se observó en dos puntos, en la calle Madero y en la 5 de mayo.
- El cauce se ve lleno de basura y el agua se percibe contaminada con aguas negras, con un caudal pequeño.
- En Madero hay una invasión sobre el cauce del río.

#### **Cauce principal, antes de unirse al arroyo Seco**

- Entre Camino a la Coladera y Prol. 5 de mayo se supone que hay un ojo de agua de donde brota el arroyo San Juanate. No fue encontrado.
- A las afueras de San Agustín, el caudal es medio, el color opaco y el olor es a aguas negras.
- Después atraviesa una zona rural, donde se observan cúmulos de tierra para evitar que el arroyo se desborde. Incluso en estos puntos se encuentran bolsas de basura que fueron arrojadas hacia el cauce pero que aún no habían sido arrastradas.

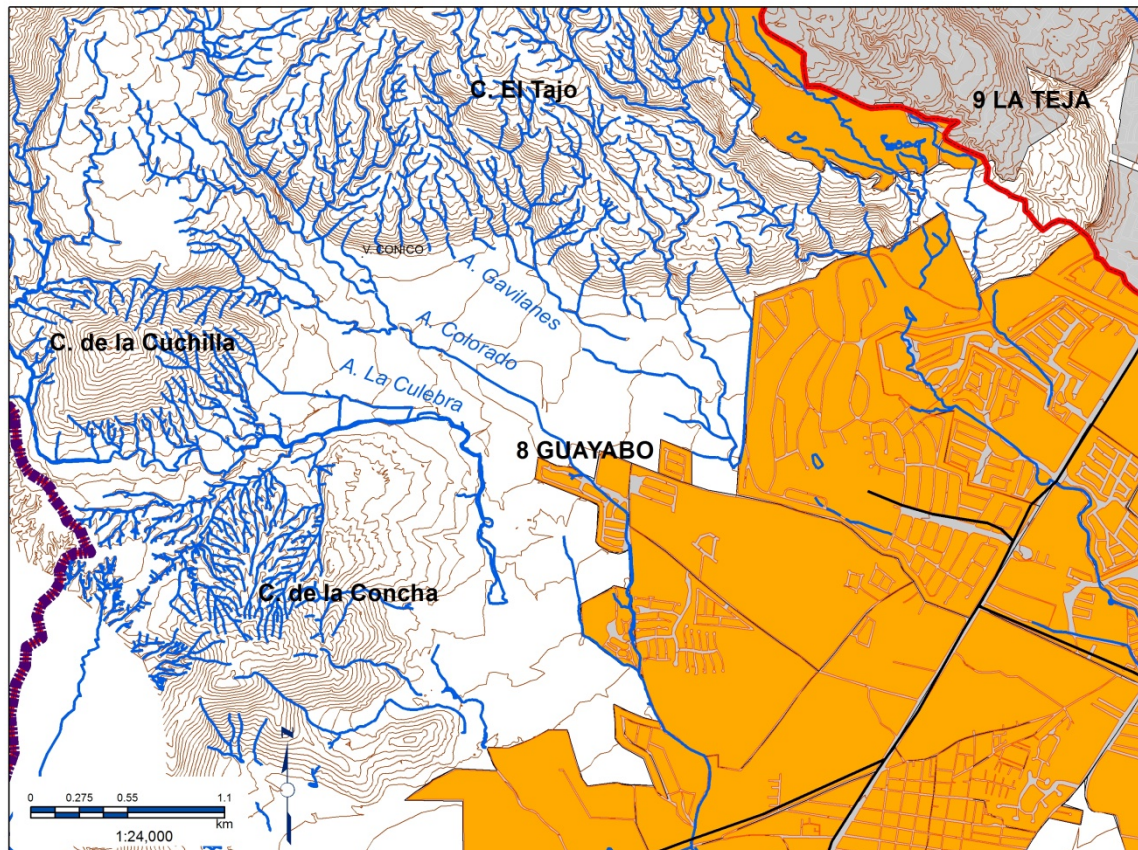
### **13.2 Progresión de la expansión urbana**

Para determinar la expansión urbana se empleó el método de análisis diferencial del territorio. Se detectó que los mapas descargados de INEGI (que deberían corresponder al censo del 2010) no contenían desarrollos y fraccionamientos que comenzaron a ser habitados antes del 2008. A partir de esta incongruencia encontrada, se tomó la decisión de contrastar gradualmente diferentes zonas dentro de la subcuenca, ya sea con imágenes satelitales, observaciones directas o finalmente consultando los planes parciales vigentes.



**Caso analizado:** Crecimiento entre Cerro del Tajo, Cerro de la Campana y Cerro de la Concha.

A lo largo del Boulevard Bosques de Santa Anita hasta el pie del Cerro de la Campana han ido surgiendo desarrollos con diferentes niveles de éxito pero que gradualmente han ido llenando las áreas bajas. A continuación se muestran imágenes de diferentes fuentes para ser contrastadas.

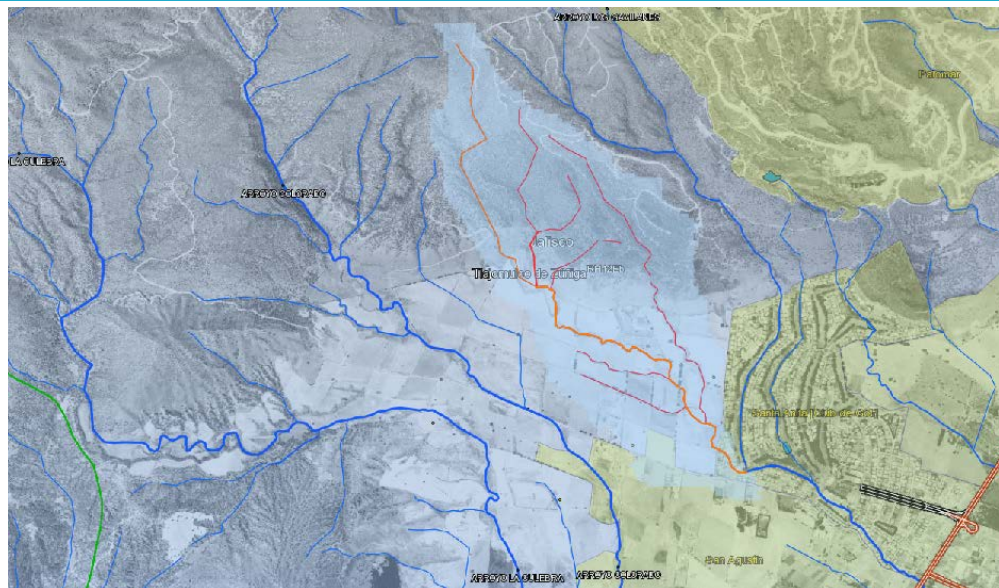


**Figura 49** Plano de la parte alta de la subcuenca del Guayabo, traza urbana de acuerdo a INEGI e hidrografía de CEA.  
Fuente: (CEA, 2010; INEGI, 2010)

De acuerdo a la figura 28, el crecimiento urbano se extendía hasta Arbolada Bosques de Santa Anita. El arroyo Colorado cruza por en medio de este fraccionamiento y después por el fraccionamiento llamado Sendero a las Moras. También se puede observar que algunos afluentes del arroyo Gavilanes son desviados en el límite poniente del Club de Golf Santa Anita, incluso uno de estos afluentes corre a lo largo de la pared perimetral.

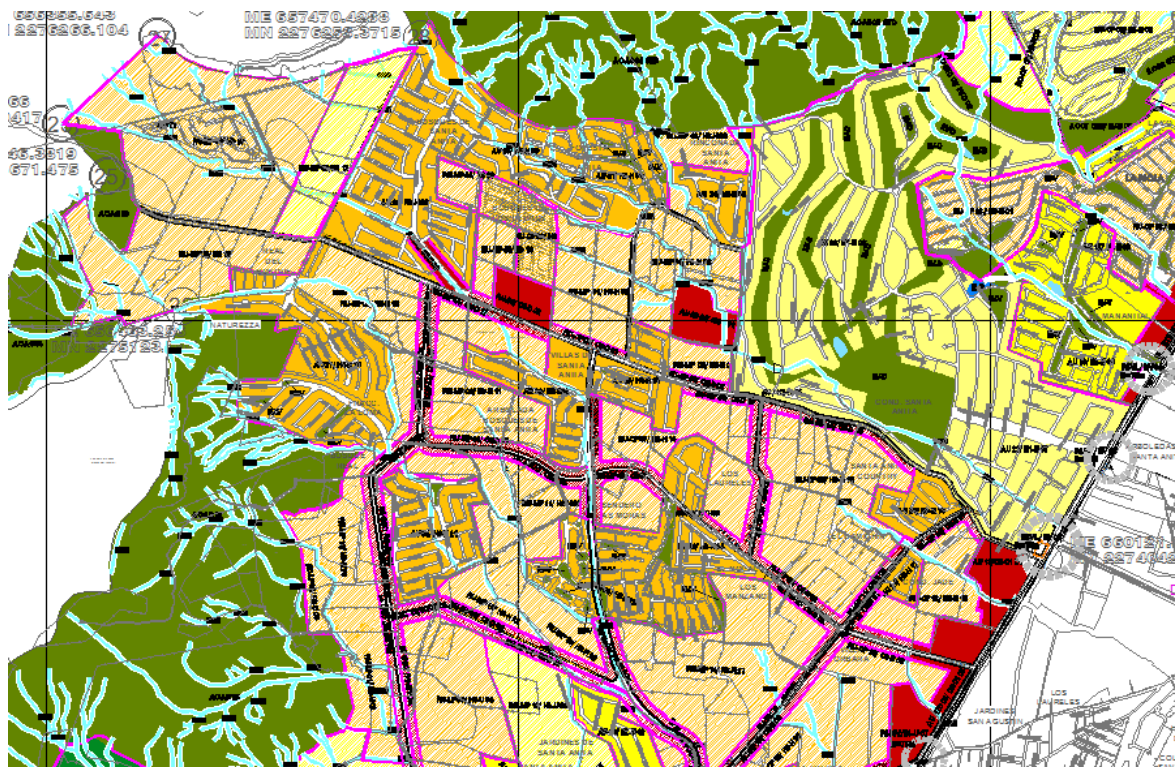
En la figura 29, estos arroyos se muestran con unas trayectorias ligeramente distintas. En un azul claro se delimita el área tributaria del arroyo Gavilanes. La ortofoto integrada en la imagen pareciera haber sido tomada antes de que existiera la traza urbana presentada por INEGI en la imagen previa.





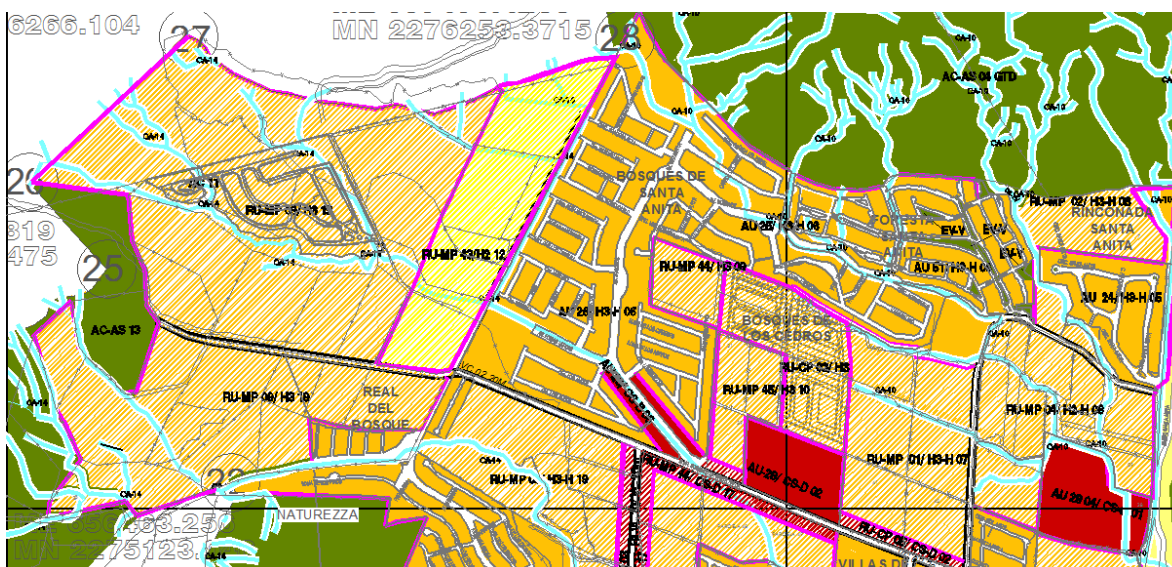
**Figura 50** Área de escurrimiento para el arroyo los Gavilanes  
Fuente: SIATL con capa de ortofoto aérea (SIATL 2014).

Ahora contrastense las imágenes previas con el plan parcial (figuras 30 y 31). En diferentes tonos de amarillo se distingue el uso de suelo habitacional, siendo el relleno achurado en diagonal la reserva urbana considerada.



**Figura 51** Recorte del Plan Parcial del Distrito Urbano 3 de Tlajomulco "El Palomar".  
Fuente: (Tlajomulco, 2014).

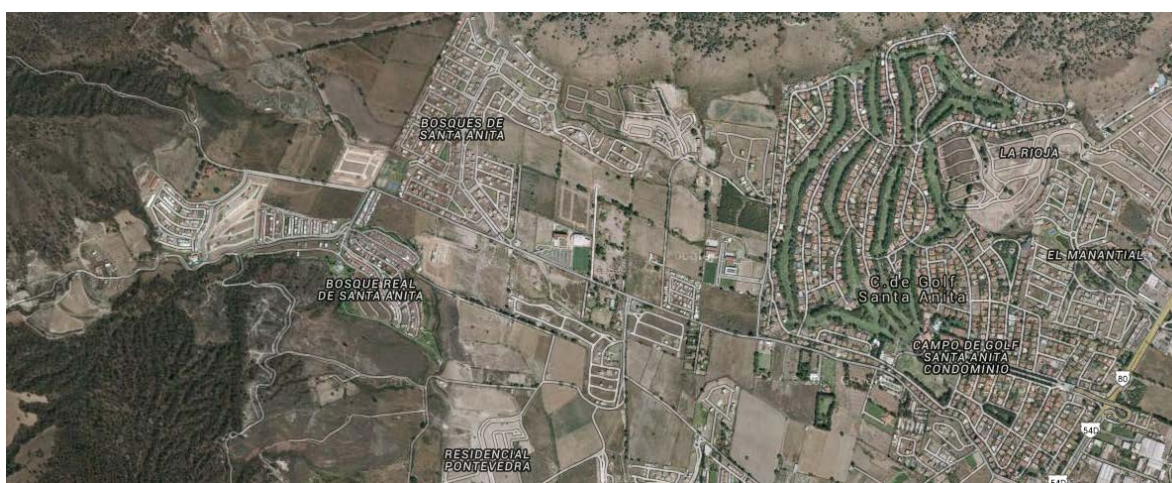




**Figura 52** Recorte del Plan Parcial del Distrito Urbano 3 de Tlajomulco “El Palomar” con acercamiento al límite norponiente del distrito.  
Fuente: (Tlajomulco, 2014).

En la figura 31, se pueden identificar las áreas urbanizadas (AU) como Bosque Real y Bosques de Santa Anita por ser de color anaranjado sólido. A su vez se distinguen los polígonos con achurado diagonal que corresponden a reservas urbanas a medio plazo (RU-MP) de uso habitacional horizontal de intensidad media (H3) y un polígono más claro de intensidad baja (H2).

En la imagen satelital de la figura 32 se puede constatar que algunas áreas consideradas como reservas urbanas ya fueron desarrolladas. Tal es el caso del fraccionamiento el Origen.



**Figura 53** Imagen satelital de la urbanización registrada a lo largo del Boulevard Bosques de Santa Anita.  
Fuente: (Google 2014)









Como ejercicio inicial para ejemplificar y practicar el modelo se ha considerado un coeficiente de escurrimiento de 0.5, y una tormenta de diseño de 50 milímetros. Un coeficiente de escurrimiento de 0.5 pretende representar el efecto combinado de áreas en estado natural con pendientes mayores al 20%, terrenos agrícolas y zonas urbanizadas con pendientes menores al 10%. En cuanto a las lluvias registradas por la estación meteorológica de Guadalajara (DGE) sólo el 2% de los eventos presentados entre 1982 y 2012 fueron mayores a 50 milímetros. Los resultados han sido condensados en la siguiente tabla, donde se ha aplicado el método de simplificación de los nombres de los segmentos propuesto anteriormente. En esta tabla se muestra el área de escurrimiento por segmento; la pendiente media desde el inicio de cauce principal hasta el extremo final del segmento; el volumen de agua drenada durante el evento propuesto (tormenta de diseño) y aplicando el coeficiente de escurrimiento utilizado para los otros cálculos; el tiempo de concentración del caudal máximo en minutos calculado con la fórmula de Kirpich; el caudal pico o máximo estimado a partir del tiempo de concentración mencionado.

Segmento	Área drenada (km <sup>2</sup> )	Pendiente Media	Vol. (m <sup>3</sup> )	Tiempo de concentración (min)	Caudal pico Qp (m <sup>3</sup> /s)
La Culebra	20.61	5.7%	206,100	74.49	46.1
C0	6.12	2.1%	15,300	83.09	3.1
C00	1.28	4.3%	6,400	18.80	5.7
C01	3.30	2.6%	16,500	55.22	5.0
C1	15.12	6.0%	113,400	70.37	26.9
C10	4.29	4.1%	21,450	30.18	11.8
C11	10.43	6.0%	52,150	68.24	12.7
C110	1.73	8.3%	8,650	15.72	9.2
C111	8.21	6.4%	41,050	61.57	11.1
C1110	0.69	2.7%	1,725	20.53	1.4
C1111	5.73	8.5%	28,650	39.48	12.1

**Tabla 23.** Tabla de variables hidrológicas de la red de afluentes del Arroyo la Culebra.

Fuente: elaboración propia

### 13.4 Clima y variables meteorológicas de Tlajomulco

Para efectos del presente trabajo en lo que a variables meteorológicas se refiere, se utiliza como referencia el Programa de Ordenamiento Ecológico Local (POEL) de Tlajomulco de Zuñiga.

En un intento de proporcionar información representativa para el municipio en su conjunto, para elaborar el POEL se recurrieron a los registros comprendidos entre 1958 y 2006 de 5 estaciones climatológicas: Acatlán de Juárez (20°26' N y 103°35' W), El Salto (20°31' N y 103°10' W), Tlaquepaque (20° 38' N y 103° 18' W), Huerta Vieja (20°27' N y 103°14' W) y Tlajomulco (20°28' N y 103°27' W); estando las tres primeras fuera del perímetro municipal pero en áreas colindantes.



No se explica si los valores meteorológicos medios proporcionados son el resultado de una media aritmética de los datos de cada estación o si se hace una ponderación georreferenciada. Únicamente se habla de procedimientos estadísticos con resultados “aproximativos del comportamiento climático a nivel municipal” (Tlajomulco de Zuñiga, Ayuntamiento de, 2010b).

Considerando la ubicación de las estaciones meteorológicas consideradas, se pueden percibir las limitaciones de este análisis dado que la cobertura espacial es deficiente tanto al sur de la entidad (vertiente norte del Cerro Bola de Viejo) como al norponiente (Bosque de la Primavera y centro norte).

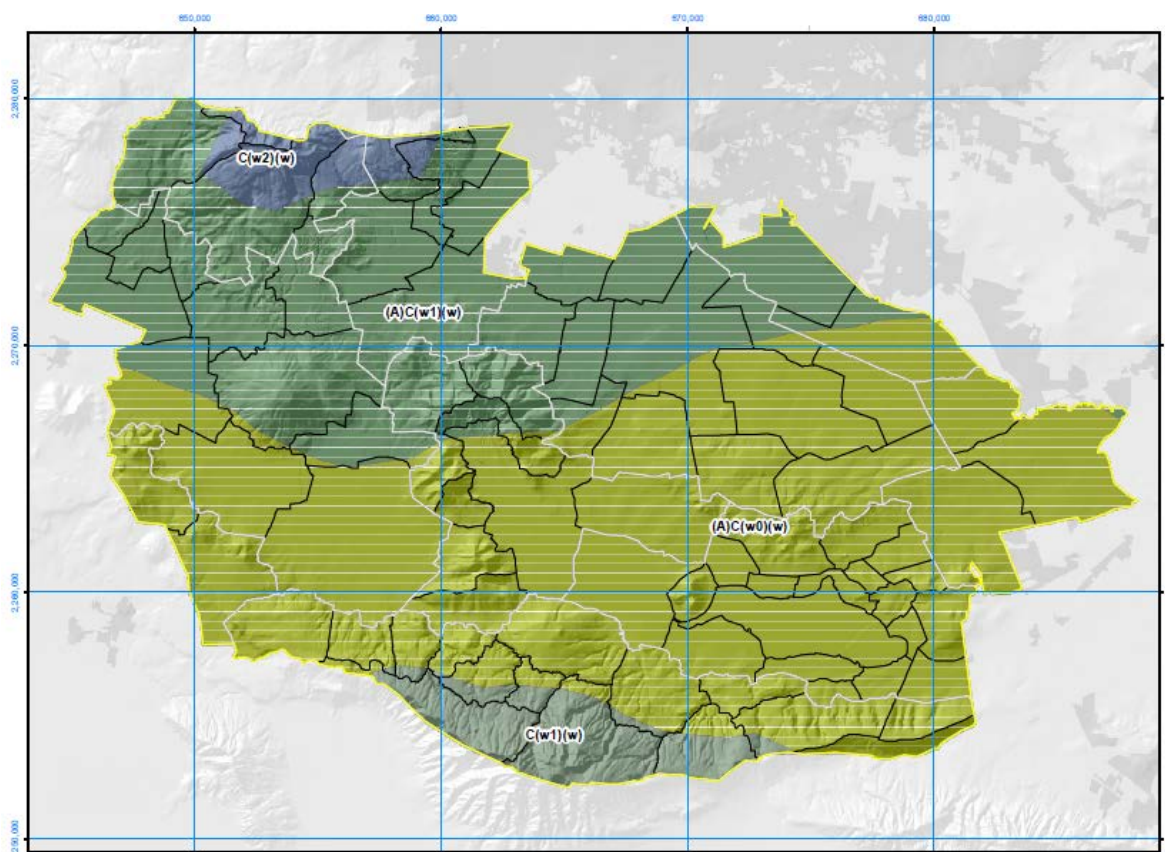
Estas carencias no parecen afectar de forma importante el estudio térmico, ya que se compensa con el gradiente térmico y la elevación. Para la precipitación, esta no se puede extrapolar tan fácilmente ya que inciden muchos factores que aún no se entienden del todo.

#### 13.4.1 Clasificación climática

El clima predominante es semicálido con temperatura media anual por encima de los 18 °C, con el mes más cálido antes del solsticio de verano y temporada de lluvias en verano, es decir  $A(C)(w1)(w)a(e)g$  de acuerdo a la clasificación de Köppen (modificada por García).

En las zonas elevadas el clima es templado con verano fresco:  $C(w1)(w)b(e)$  salvo en la cumbre del Cerro Bola del Viejo, donde es semifrío y con humedad alta:  $C(w2)(w)(b')(e)$ .

La subcuenca del Guayabo se encuentra en la zona centro norte del municipio donde el clima dominante es semicálido con humedad media salvo en las partes altas del Bosque de la Primavera donde es templado.



**Figura 59.** Mapa de clasificación climática del municipio de Tlajomulco de acuerdo a Köppen.

Fuente: extraído del Mapa 2.3 Clima y variables climáticas (Tlajomulco de Zuñiga, Ayuntamiento de, 2010b).

#### TIPO DE CLIMA

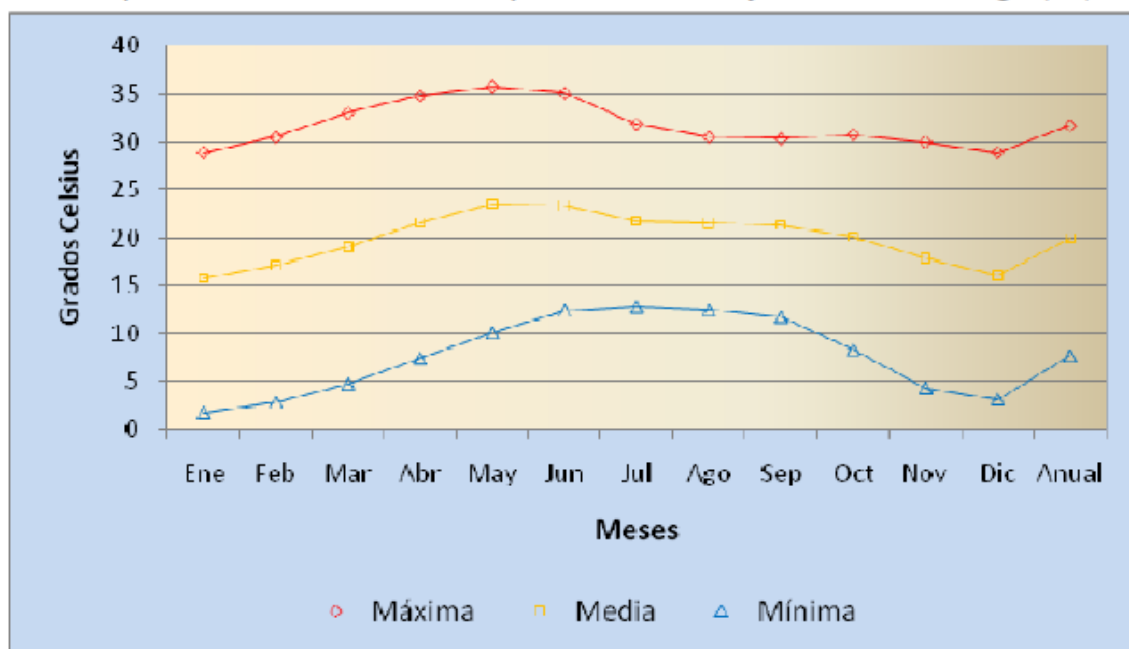
	(A)C(w0)(w)	Templado semicalido subhúmedo de humedad mínima con lluvias en verano, precipitación invernal < 5mm, temperatura media anual > 18°C
	(A)C(w1)(w)	Templado semicalido subhúmedo de humedad media con lluvias en verano, precipitación invernal < 5mm, temperatura media anual > 18°C
	C(w1)(w)	Templado subhúmedo de humedad máxima con lluvias en verano, precipitación invernal < 5mm, temperatura media anual entre 12 y 18°C
	C(w2)(w)	Templado subhúmedo de humedad media con lluvias en verano, precipitación invernal < 5mm, temperatura media anual entre 12 y 18°C

**Figura 60.** Simbología del mapa previo. Se anexa de esta forma por legibilidad.

Fuente: extraído del Mapa 2.3 Clima y variables climáticas (Tlajomulco de Zuñiga, Ayuntamiento de, 2010b).

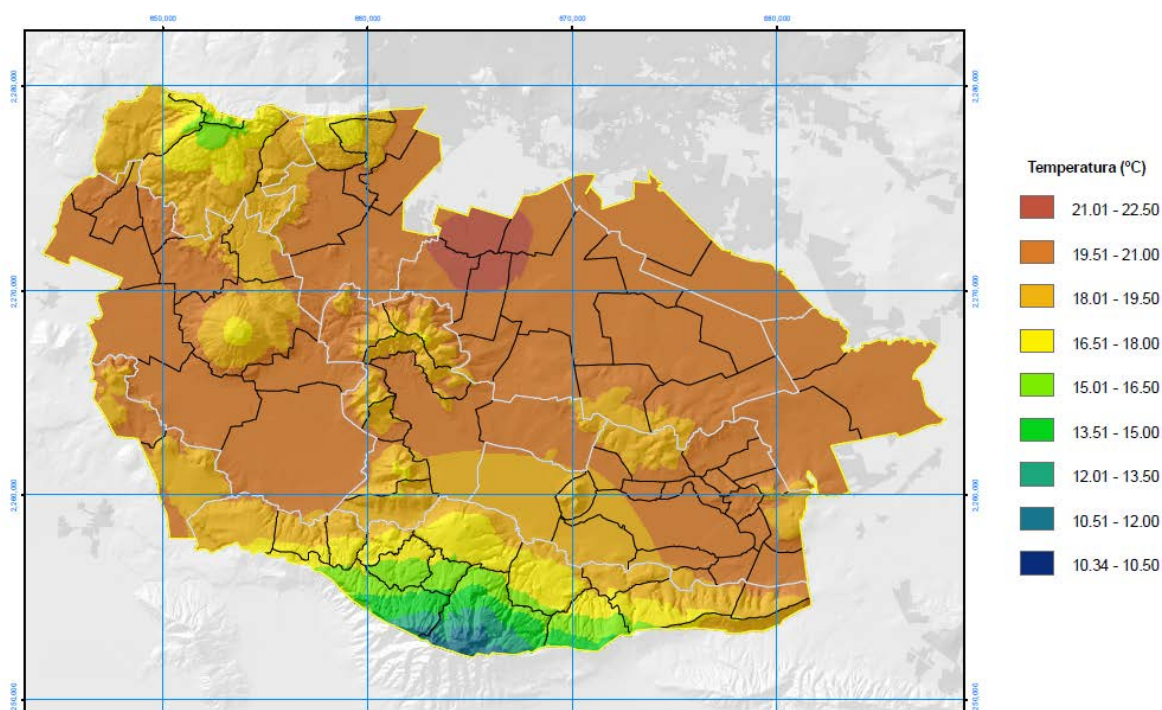
### 13.4.2 Temperatura

En lo que respecta a la temperatura, las mayores temperaturas se registran alrededor de mayo así como las más bajas alrededor de enero. Los meses con mayor variación entre la temperatura máxima y mínima son enero, febrero, marzo y abril, con una oscilación superior a los 27 °C, mientras que durante el verano la oscilación es menor a 20 °C. La fluctuación a lo largo del año se puede observar en el siguiente gráfico:



**Figura 61.** Variación de temperatura máxima, media y mínima mes con mes en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga.  
Fuente: (Tlajomulco de Zúñiga, Ayuntamiento de, 2010b).

En una representación espacial, la temperatura media anual se distribuye por el territorio de acuerdo a la elevación primordialmente, tal como se puede apreciar en la ilustración siguiente:



**Figura 62.** Mapa de temperatura media anual del municipio de Tlajomulco de Zúñiga.  
Fuente: extraído del Mapa 2.3 Clima y variables climáticas (Tlajomulco de Zúñiga, Ayuntamiento de, 2010b).

### 13.4.3 Precipitación

En lo que respecta a las lluvias, se estima una lluvia anual promedio para el municipio de 883.5 mm siendo el mes más lluvioso es julio que recibe una cuarta parte del total, y casi el 85% se registra entre junio y septiembre. Los valores de la tabla siguiente fueron utilizados como referencia para efecto de los cálculos de esta investigación.

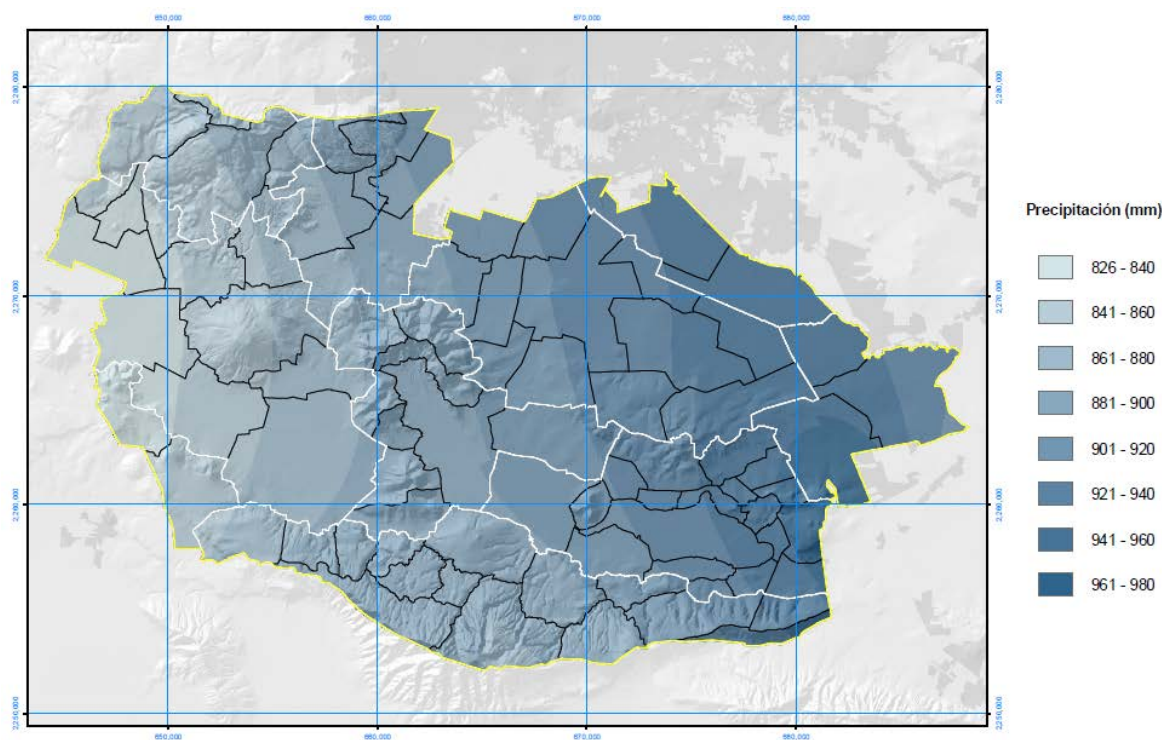
Precipitación media, mensual y anual en Tlajomulco de Zúñiga (mm)

VARIABLE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Precipitación	17.4	5.7	3.3	5.5	27.9	174.8	225.1	194.9	149.1	56.2	14.4	9.2	883.5
Días	1.7	1.1	0.6	0.9	3.1	13.8	18.7	17.5	13.7	5.6	1.5	1.6	79.8

**Tabla 24.** Precipitación media, mensual y anual en Tlajomulco de Zúñiga.

Fuente: (Tlajomulco de Zúñiga, Ayuntamiento de, 2010b).

Se atribuye a las posibles limitaciones del estudio por falta de estaciones meteorológicas el hecho de que en la gráfica que sigue, se aprecien isoyetas en forma de bandas muy regulares de oriente a poniente, indistintamente de la presencia de regiones naturales importantes (tales como La Primavera y Cerro Bola de Viejo).



**Figura 63.** Mapa de precipitación media anual del municipio de Tlajomulco de Zúñiga.

Fuente: extraído del Mapa 2.3 Clima y variables climáticas (Tlajomulco de Zúñiga, Ayuntamiento de, 2010b).

Únicamente a manera ilustrativa se presentan las estadísticas climáticas normales para la cabecera municipal en la tabla siguiente. Se observa como estas difieren de los valores obtenidos para el municipio en general.

1961-2010

Tipo climático: (A)Ca(w<sub>0</sub>)(w)e

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura máxima media (°C)	26.2	27.9	29.9	31.8	32.7	30.0	27.5	27.3	27.2	27.5	27.5	26.1	28.5
Temperatura máxima maximorum (°C)	33.0	40.5	36.0	38.0	39.5	40.0	34.0	34.0	33.0	34.0	34.0	35.0	40.5
Temperatura mínima media (°C)	3.5	5.1	7.1	10.2	12.7	15.7	15.3	15.0	14.5	11.4	6.5	4.1	10.1
Temperatura mínima minimorum (°C)	-6.5	-4.5	-0.5	3.0	6.0	7.0	8.0	9.5	4.0	0.0	-4.0	-4.5	-6.5
Temperatura media (°C)	14.9	16.5	18.5	21.0	22.7	22.8	21.4	21.2	20.8	19.5	17.0	15.1	19.3
Temperatura diurna media (°C)	21.3	22.8	24.5	26.5	27.6	26.3	24.4	24.3	24.1	23.9	22.9	21.4	24.2
Temperatura nocturna media (°C)	8.4	10.3	12.5	15.6	17.8	19.3	18.4	18.1	17.5	15.1	11.1	8.8	14.4
Oscilación térmica (°C)	22.7	22.8	22.8	21.6	20.0	14.3	12.3	12.3	12.7	16.1	21.0	22.0	18.4
Precipitación (mm)	19.9	4.4	2.3	5.6	19.7	169.1	193.1	176.4	134.5	41.1	7.1	5.5	778.8
Precipitación máxima en 24 horas (mm)	78.0	28.5	16.0	34.0	32.5	59.0	98.4	78.0	89.0	62.0	18.0	32.5	98.4
Número de días con lluvia	1.6	0.5	0.5	0.6	2.6	14.4	17.6	18.0	13.7	5.8	1.3	1.2	77.9
Evaporación (mm)	134.8	163.8	259.2	269.2	295.6	233.5	199.7	160.2	125.9	119.0	116.6	116.3	2193.8
Evapotranspiración potencial (mm)	107.8	131.0	207.4	215.4	236.5	186.8	159.7	128.2	100.7	95.2	93.3	93.0	1755.1
Fotoperíodo (hr)	10.9	11.4	11.9	12.5	12.9	13.2	13.1	12.7	12.1	11.5	11.0	10.8	12.0

**Tabla 25.** Normales climáticas de la estación meteorológica de Tlajomulco (cabecera municipal).

Fuente: (Ruiz-Corral, José Ariel; Flores -López, Hugo Ernesto; Regalado-Ruvalcaba, José Ricardo; Ramírez-Ojeda, Gabriela, 2012).



### 13.5 Cálculo estadístico para estimar la variación de la lluvia anual promedio

Los fenómenos meteorológicos distan mucho de ser determinísticos o predecibles. Hay años con lluvias abundantes y otros con sequías. Es interés del presente trabajo determinar la fluctuación de la precipitación anual, de modo que se pueda garantizar un volumen mínimo de agua disponible de forma continua con un alto nivel de confianza.

Si bien los valores promedio de precipitación mensual están disponibles, no se encontraron datos estadísticos que permitieran entender mejor la distribución de los datos y la variabilidad de estos.

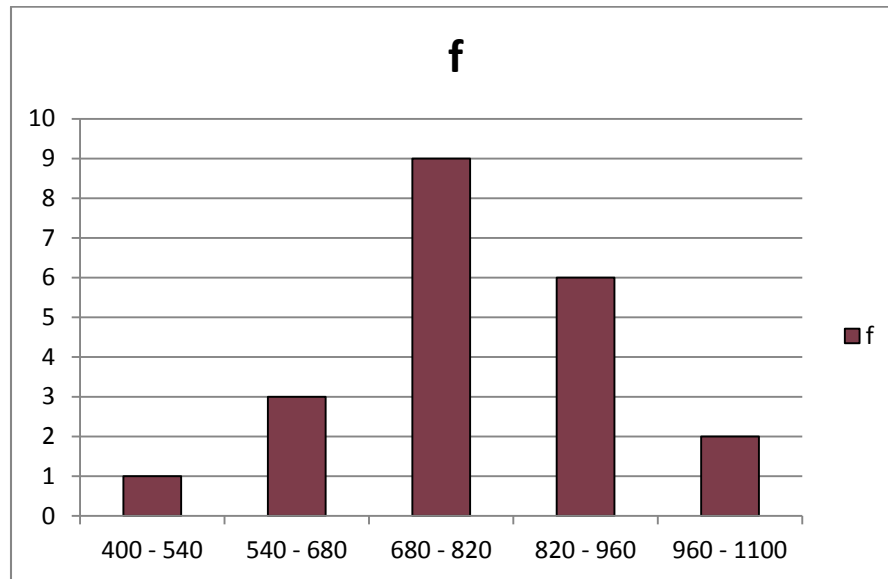
Por lo tanto, fue necesario buscar registros históricos que permitieran contar con un número de muestras suficiente como para ser representativa y confiable. Estos registros sólo se encontraron en la Base de Datos Climatológica Nacional del CICESE (CICESE, 2015). Se proporciona un archivo por estación meteorológica y este contiene los registros diarios de precipitación.

Los valores que aparecen para la estación meteorológica de Tlajomulco comienzan a finales de 1973 y llegan hasta finales del 2011. Entre 1975 y 1985, así como del 2007 al 2011 no existen suficientes registros para reconstruir el valor de precipitación anual correspondiente.

Año	Precipitación (mm)	Días sin registro
1974	730.6	
1986	887.7	28 (febrero)
1987	794.5	
1988	955	
1989	615.3	
1990	961	
1991	806.4	
1992	1077.5	
1993	589.6	
1994	867.3	
1995	741.3	
1996	778.3	
1997	753.7	
1998	614.7	
1999	772.1	
2000	403.2	31 (diciembre)
2002	832.3	61 (nov, dic)
2003	902.5	62 (ene,mar)
2004	880	
2005	750	
2006	784.8	31 (dic)

**Tabla 26.** Precipitación anual registrada entre 1974 y 2006 por la estación meteorológica de Tlajomulco.  
Fuente: elaboración propia a partir de registros históricos (CICESE, 2015)





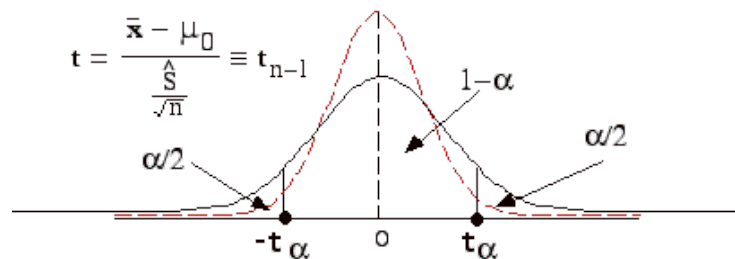
**Figura 64.** Distribución estadística de las precipitaciones anuales registradas entre 1974 y 2006 por la estación meteorológica de Tlajomulco.

Fuente: elaboración propia a partir de registros históricos (CICESE, 2015)

La media  $\bar{x}$  de estos datos ( $n = 21$ ) es de 785.6mm. La desviación estándar  $s$  de la muestra es 134.6mm. Como los datos son resultado de sumar las precipitaciones diarias, el Teorema del Límite Central aplica, lo que tiene como consecuencia que la distribución sea normal. Sin embargo, como el número de muestras es pequeño, se asume una distribución  $t$  con 20 grados de libertad (“grados de libertad” =  $n - 1 = 20$ ). El intervalo de confianza se calcula como:

$$\bar{x} - t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Donde  $1 - \alpha$  es el coeficiente de confianza y  $t_{\alpha/2}$  es el valor de  $t$  que define un área de  $\frac{\alpha}{2}$  en una de las colas de la distribución  $t$  con  $n-1$  grados de libertad.



**Figura 65.** Distribución  $t$  e intervalos de confianza.

Al aplicar esta fórmula a la muestra, se tiene con un nivel de confianza del 95% que la media de la población se encuentra en el siguiente rango:

$$785.61 \text{ mm} - 50.68 \text{ mm} < \mu < 785.61 \text{ mm} + 50.68 \text{ mm}$$

$$734.93 < \mu < 836.29$$

## 13.6 Cálculo del balance hídrico por el método de Thornthwaite

### 13.6.1 Fundamentos teóricos del método

Thornthwaite (Thornthwaite, C. W., 1948) señala el papel relevante de la evaporación y la transpiración en el clima, dado que representa el transporte del agua de vuelta a la atmósfera. Un clima es seco o húmedo de acuerdo a la relación entre precipitación y evapotranspiración. Esto de igual forma influye en la vegetación presente.

Después define la evapotranspiración potencial como el punto máximo de evaporación posible de existir agua disponible para determinadas condiciones. La utiliza para obtener una definición racional del factor de humedad al comparar la ETP con la precipitación.

Mientras que la precipitación es un proceso estrictamente físico, la evapotranspiración tiene un componente biológico. De acuerdo a los estudios disponibles entonces, concluye que la tasa de evapotranspiración depende de cuatro elementos: clima, provisión de humedad de suelo, cubierta vegetal y manejo del terreno; señalando las dos primeras como las más relevantes.

Presenta la transpiración como un mecanismo de la planta para proteger las superficies expuestas al sol de sobrecalentarse. Mediante la fotosíntesis, la planta combina la energía del sol y el dióxido de carbono en las hojas para producir alimento. Este proceso es más eficiente entre 30°C y 32°C. El exceso de calor es conducido hacia el aire adyacente, utilizando energía para la transpiración al convertir el agua líquida en vapor. La formación de rocío durante la noche es el proceso inverso para evitar temperaturas bajas extremas. La transpiración y el crecimiento están ligadas de la misma manera a la temperatura.

Los elementos atmosféricos que influyen la transpiración son la radiación solar, la temperatura del aire, el viento y la humedad atmosférica. Todos ellos están interrelacionados. Aunque la radiación solar es el factor principal, pareciera que la correlación mayor de la tasa de transpiración se da con la temperatura.

De igual modo, la transpiración y el crecimiento son afectados de la misma manera por variaciones en la humedad del suelo. Ambas crecen con el aumento de agua disponible en la zona de la raíz hasta alcanzar un óptimo.

La cantidad de agua en la zona de la raíz disponible a la planta varía de acuerdo al suelo y la distribución de las raíces. Sin embargo, varía alrededor de una media de 10 centímetros de precipitación. Este valor se toma en cuenta como reserva disponible en el suelo para perderse y a su vez como la capacidad máxima del suelo para retener agua.

#### Cálculo de Evapotranspiración Potencial

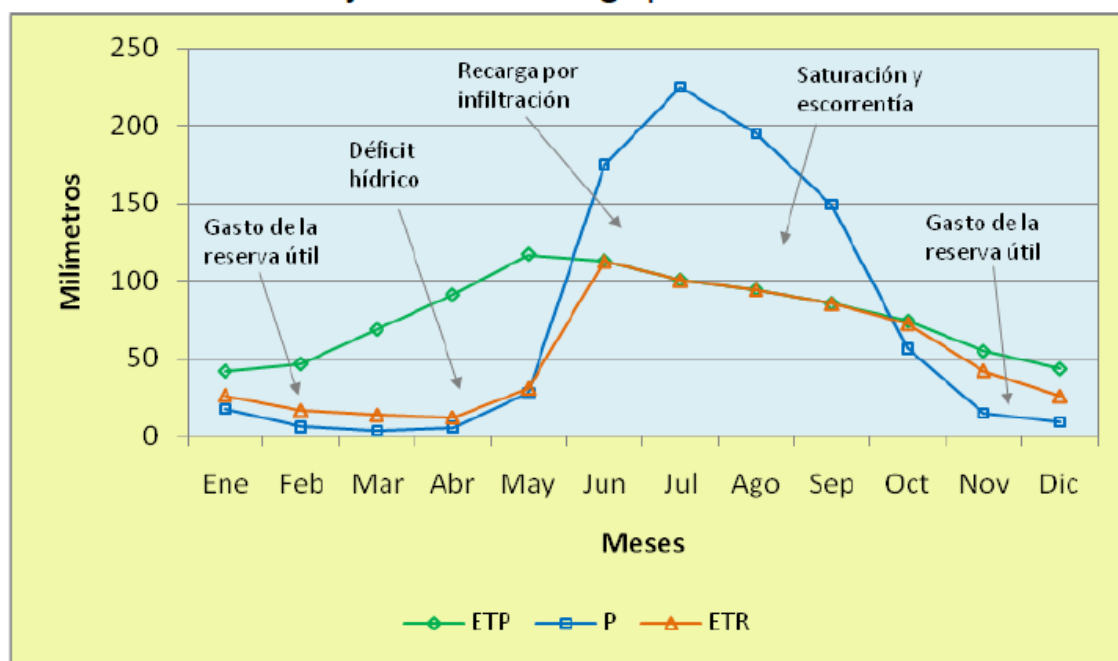
El método de Thornthwaite es un método muy empleado dado que precisa de pocas variables para su cálculo, tan sólo la temperatura media mensual y la latitud del lugar de estudio.

Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.

### 13.6.2 Cálculo de la evapotranspiración potencial

### 13.6.3 Cálculo de la evapotranspiración real y balance hídrico

#### Balance hídrico en Tlajomulco de Zúñiga por el método de Thornthwaite



**Figura 66.** Balance hídrico en Tlajomulco de Zúñiga utilizando el método de Thornthwaite, siendo ETP la evapotranspiración potencial, ETR la evapotranspiración real y P la precipitación  
Fuente: POEL Tlajomulco (Tlajomulco de Zúñiga, Ayuntamiento de, 2010b)

Cuadro 2-5  
Balance hídrico en Tlajomulco de Zúñiga

VARIABLE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
ETP	41.8	46.4	68.6	90.7	116.8	112.7	100.2	94.3	85.2	73.9	54.4	43.2	928.2
P	17.4	5.7	3.3	5.5	27.9	174.8	225.1	194.9	149.1	56.2	14.4	9.2	883.5
P-ETP	-24.4	-40.7	-65.3	-85.2	-88.9	62.1	124.9	100.6	63.9	-17.7	-40	-34	---
Σd	-116.1	-156.8	-222.1	-307.3	-396.2	0	0	0	0	-17.7	-57.7	-91.7	---
RU	31.3	20.8	10.8	4.6	1.9	64	100	100	100	83.8	56.2	40	---
VRU	8.7	10.5	10	6.2	2.7	-62.1	-36	0	0	16.2	27.6	16.2	---
ETR	26.1	16.2	13.3	11.7	30.6	112.7	100.2	94.3	85.2	72.4	42	25.4	630.1
D	15.7	30.2	55.3	79	86.2	0	0	0	0	1.5	12.4	17.8	298.1
S	0	0	0	0	0	0	88.9	100.6	63.9	0	0	0	253.4

Tabla 27. Balance hídrico del municipio de Tlajomulco de Zúñiga.  
Fuente: POEL Tlajomulco (Tlajomulco de Zúñiga, Ayuntamiento de, 2010b)

ETP: Evapotranspiración potencial o de referencia ( $ET_0$ )  
 P: Precipitación  
 $\Sigma d$ : Sumatoria del déficit (L, accumulated potential water loss)  
 RU: Reserva útil (A)  
 VRU: Variación de la reserva útil ( $\Delta A$ )  
 D: Déficit del agua  
 S: Superávit  
 $A_c$ : Capacidad de almacenamiento del suelo (se usó 100 mm)

	$(P - ETP)[k] \geq 0$	$(P - ETP)[k] < 0$
$\Sigma d$	0	$\Sigma d[k-1] + (P - ETP)[k]$
RU	$(P - ETP)[k] + RU[k-1]$ o $A_c$ el que resulte menor	$A = A_c e^{-\frac{L}{A_c}}$
ETR	ETP[k]	$P[k] + VRU[k]$
D	0	$-(P - ETP)[k] - VRU[k]$
S	$(P - ETP)[k] + VRU[k]$	0

**Tabla 28.** Definición de variables del balance hídrico para temporal de lluvias y de secas.

Fuente: (Dourado-Neto, Durval; de Jong van Lier, Quirijn; Metselaar, Klaas; Reichardt, Klaus; Nielsen, Donald R, 2010)

Se utiliza el método de Thornthwaite para estimar ETP (Thornthwaite, C. W., 1948) y el método de Thornthwaite y Mather de 1955 para calcular ETR (Dourado-Neto, Durval; de Jong van Lier, Quirijn; Metselaar, Klaas; Reichardt, Klaus; Nielsen, Donald R, 2010)

## 14. Bibliografía

- Abellán, Ana. (2013). Origen de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. Consultado 5 septiembre 2015, en <http://drenajeyurbanosostenible.org/tecnicas-de-drenaje-sostenible/>
- Abellán, Ana. (2015). Planificación urbana sostenible del agua. Consultado 5 septiembre 2015, 2015, en <http://ovacen.com/planificacion-urbana-sostenible-del-agua/>
- Abt, S.R.; Wittler, R. J.; Taylor, A.; Love, D. J. (1989). Human Stability in a High Flood Hazard Zone. AWRA
- Water Resources Bulletin*, Vol. 25(Nº 4).
- Alatorre, Norberto. (s.f.). La microcuenca como elemento de estudio de la vulnerabilidad ambiental. Morelia: El Colegio de Michoacán.
- Ander-Egg, Ezequiel. (2004). Aproximaciones al conocimiento del conocimiento. En L. Humanitas (Ed.), *Métodos y técnicas de investigación social: la ciencia: su método y la expresión del conocimiento científico* (pp. 25-73). Buenos Aires, Argentina.
- Auckland, Council of. (s.f.). Raingardens. Operation & Maintenance Guide.
- Barcelona, Agencia d'Ecología Urbana de. (2007). Indicadores relacionados con el metabolismo urbano *Plan especial de indicadores de la actividad urbanística del nuevo PGOU de Sevilla*
- CCRC. (1999). *Hydrological criteria and drainage design manual*. Clark County, Estados Unidos.
- CEA. (2009). Proyecto Integral de Saneamiento y Abastecimiento de la Zona Conurbada de Guadalajara. 2013, en <http://www.ceajalisco.gob.mx/zcg-proyecto.swf>
- CEA. (2010). Cuenca el Ahogado. Consultado mayo 2014, 2015, en <http://www.ceajalisco.gob.mx/ahogado.html>
- CEA, Jalisco. (s.f.). Manual Técnico de Sistema Hidráulico de Alcantarillado Sanitario y Pluvial.
- CICESE. (2015). Base de Datos Climatológica Nacional (Sistema CLICOM). Consultado 07-18-2015, 2015, en <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- Daly, Herman E. (1990). Toward some operational principles of sustainable development *Ecological Economics* (Vol. 2). Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V. .
- Díaz-Cuenca, Elizabeth, Alvarado-Granados, Alejandro, y Camacho-Calzada, Karina (2012). El tratamiento del agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Quivera*, 14.
- DOF. (2013). *Ley de Aguas Nacionales*. México: Diario Oficial de la Federación.
- Dourado-Neto, Durval; de Jong van Lier, Quirijn; Metselaar, Klaas; Reichardt, Klaus; Nielsen, Donald R. (2010). General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. *Sci. Agric.*, 67(1), 87-95.
- Dryzek, John S. (1997). *The Politics of the Earth: Environmental Discourses*. USA: Oxford University Press.
- Elizondo, Dagoberto. (2005). El biodigestor.
- EPA. (2009). *Technical Guidance on Implementing the Stormwater Runoff Requirements for Federal Projects under Section 438 of the Energy Independence and Security Act*. Washington, DC.
- FAO. (2007). *La nueva generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas*. Roma.
- FAO. (s.f.). Nota Técnica 1: La Microcuenca como ámbito de planificación de los recursos naturales.



- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology* (4ta ed.). United States: Prentice Hall.
- García-Rivero, José Luis. (2007, 1/1/2007). Siasa-0. *obrasweb*.
- Gleason-Espíndola, José Arturo. (2012). Hacia una gestión sustentable del agua en la Zona Metropolitana de Guadalajara. En H. Ochoa-García y H.-J. Bürkner (Eds.), *Gobernanza y gestión del agua en el Occidente de México: La metrópoli de Guadalajara*. Guadalajara: ITESO.
- Gómez, M.; Russo, B.; (2009). *Criterios de riesgo asociados a escorrentía urbana*. Paper presented at the Jornadas de Ingeniería del Agua.
- Google. (2015). Google Maps. Retrieved 29 de agosto de 2015 [www.google.com.mx/maps/](http://www.google.com.mx/maps/)
- GPEDUIS. (2011). DUIS. Consultado marzo 2015, en <http://www.duis.gob.mx/>
- Gutiérrez Chaparro, Juan José; Villar Calvo, Alberto Javier ; Méndez Ramírez, José Juan. (2010). *Evaluación teórico-crítica del modelo de la planeación urbana mexicana: una alternativa para reflexión de los procesos de planeación en ciudades intermedias de América Latina*. Paper presented at the XI Seminario Internacional de la Red Iberoamericana de Investigadores sobre Globalización y Territorio, Mendoza, Argentina.
- GWP, Global Water Partnership. (2011). ¿Qué es la GIRH? Consultado 24/11/2013, 2013, en <http://www.gwp.org/GWP-Sud-America/PRINCIPALES-DESAFIOS/Que-es-la-GIRH/>
- Hansen, Anne M; Afferden, Manfred van. (2004). El Lago de Chapala: destino final del río Lerma. En A. M. d. Ciencias (Ed.), *El agua en México vista desde la academia*.
- ILBI. (2010). *Desafío del Edificio Vivo 2.0: Un camino visionario hacia un futuro de restauración*
- INECC. (2015). Sistema de Consulta de las Cuencas Hidrográficas de México. Consultado 24 de septiembre de 2015, en <http://cuencas.ine.gob.mx/cuenca/>
- INEGI-INE-CONAGUA. (2007). Delimitación de las Cuencas Hidrográficas de México a escala 1:250 000.
- INEGI. (2010). Geografía. Temas. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geografia/default.aspx>
- INEGI. (2015). SIATL. Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas. Consultado 24 de septiembre de 2015, en [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/SIATL/#](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#)
- Informador, El. (2013, 21 de agosto 2013). La ZMG consume el doble de agua que ciudades europeas., *El Informador*. Retrieved from <http://www.informador.com.mx/jalisco/2013/480092/6/la-zmg-consume-el-doble-de-agua-que-ciudades-europeas.htm>
- Reglamento Estatal de Zonificación, No. 42 C.F.R. (2001).
- Jalisco, Periódico Oficial del Estado de. (2014). *Resolutivo de la comisión tarifaria del Sistema Intermunicipal de los servicios de Agua Potable y Alcantarillado mediante el cual determina las cuotas y tarifas que durante el ejercicio fiscal 2015 deberán pagar los usuarios derivado de la prestación de servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición final de las aguas residuales que reciban por parte de este organismo operador intermunicipal*. Guadalajara: Periódico Oficial del Estado de Jalisco.
- Kravicik, M; Pokorný, J; Kohutiar, J; Kovac, M; Toth, E. (2007). *Water for the recovery of the climate: A new water paradigm*. Zilina, Eslovaquia: Krupa Print.
- Lara-Borrero, Jaime Andrés. (1999). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. (Master en Ingeniería y Gestión Ambiental), Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Leal, Gabriel Enrique. (2004?). Debate sobre la sostenibilidad. *Desarrollo Conceptual y Metodológico de una Propuesta de Desarrollo Urbano Sostenible para la Ciudad-Región Bogotá en clave de ciudad Latinoamericana*.

- León-Garza, Eduardo. (2006). Sistema Integral de Abasto y Saneamiento de Agua con Descarga Cero. México: [www.aguas.org.mx](http://www.aguas.org.mx).
- López-Ramírez, Mario Edgar. (2013, 12 de mayo 2013). La metáfora de la casa y el tinaco: sobre el abastecimiento de agua para Guadalajara, *Jornada Jalisco, La*. Retrieved from <http://www.lajornadajalisco.com.mx/2013/05/12/la-metafora-de-la-casa-y-el-tinaco-sobre-el-abastecimiento-de-agua-para-guadalajara/>
- López-Ramírez, Mario, y Ochoa-García, Heliodoro. (2012). Geopolítica del agua en la zona metropolitana de Guadalajara: Historia y situación actual del espacio vital. En H. Ochoa-García y H.-J. Bürkner (Eds.), *Gobernanza y gestión del agua en el Occidente de México: La metrópoli de Guadalajara*.: ITESO.
- Ilge, Lydia, y Schwarze, Reimund. (2006). A matter of opinion: How ecological and neoclassical environmental economists think about Sustainability and Economics, 3-24.
- Monet, Claude. (1897). Mañana en el Sena bajo la lluvia. Paris.
- Moreno Díaz, Alonso; Renner, Isabel. (2007). Gestión Integral de Cuencas.
- La experiencia del Proyecto Regional Cuencas Andinas.
- Nuño, Analy S. (2012, 21/09/2012). Nuevas tarifas de agua a partir de enero de 2013, *La Jornada Jalisco*.
- Olaya-Arboleda, Yeison, y González-Salcedo, Luis Octavio. (2009). Fundamentos para el diseño de biodigestores.
- Perales, Sara. (2008). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)* Paper presented at the Expo Zaragoza 2008, Zaragoza.
- <http://www.zaragoza.mobi/contenidos/medioambiente/cajaAzul/33S8-P3-Sara%20PeralesACC.pdf>
- Pérez-Vega, Ignacio. (2014, 28 de marzo 2014). Desde el lunes, tandeos a mil 108 colonias de ZMG, *La Jornada Jalisco*. Retrieved from <http://www.lajornadajalisco.com.mx/2014/03/28/desde-el-lunes-tandeos-a-mil-108-colonias-de-zmg-niega-siapa-catastrofe-hidrica/>
- Pistonesi, Carlos, Haure, José Luis, y D'Elmar, Roberto. (2010). Energía a partir de las aguas residuales.
- Plascencia, Ángel (2013, 4 de diciembre de 2013). Encuentran arsénico en agua de Jalisco, *Reporte Índigo*.
- Prince George, County of. (1999). *Low-Impact Development Design Strategies. An integrated design approach*. Largo, Maryland, Estados Unidos.
- Román Morales, Luis Ignacio; Foust Rodríguez, David; Sandoval, Yubal. (2013). Desigualdad urbana en las ciudades de América Latina y el Caribe: el caso de Guadalajara, México.
- Rueda, Fernando; Centeno, Juan Carlos. (2014). *Impacto hidrológico cero y su aplicación en la Cuenca del Río Atemajac en Jalisco, México*. Paper presented at the XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, Puerto Vallarta, Jalisco.
- Rueda, Salvador. (1997). Metabolismo y complejidad del sistema urbano a la luz de la ecología. Consultado 24-11-2013, 2013, en <http://habitat.aq.upm.es/cs/p2/a008.html/>
- Ruiz-Corral, José Ariel; Flores -López, Hugo Ernesto; Regalado-Ruvalcaba, José Ricardo; Ramírez-Ojeda, Gabriela. (2012). *Estadísticas climáticas normales del Estado de Jalisco*. Tepatitlán de Morelos, Jalisco: INIFAP.
- SHF. (2010). *Metodología DUIS*.
- SIAPA. (2014a). Informe de actividades y resultados Abril - Junio 2014. Guadalajara.
- SIAPA. (2014b). Informe de actividades y resultados Enero - Marzo 2014. Guadalajara.

- SIAPA. (2014c). Informe de actividades y resultados. Tercer trimestre 2014. Guadalajara.
- SIAPA. (2015). Informe de actividades y resultados. Cuarto trimestre 2014. Guadalajara.
- Sisolak, Joel; Spataro, Kate. (2011). *Toward net zero water: Best management practices for decentralized sourcing and treatment* (C. G. B. Council Ed.). Seattle: Cascadia Green Building Council.
- SMN. (2010). Normales climatológicas de Guadalajara (1951-2010). Mexico.
- Thorntwaite, C. W. (1948). An approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.
- Tlajomulco de Zuñiga, Ayuntamiento de. (2010a). *PMDU*.
- Tlajomulco de Zuñiga, Ayuntamiento de. (2010b). *Programa de Ordenamiento Ecológico Local* Tlajomulco de Zuñiga, Jalisco.
- Water, Western Australia Department of. (2011). Swales and buffer strips. In G. o. W. Australia (Ed.).
- WBM, BMT. (2009). *Evaluating options for water sensitive urban design - a national guide*. Sidney, Australia.
- Zanuccoli, Mariel, Moscoloni, Nora, y Portapila, Margarita. (2010). Perfiles socio-metabólicos y conflictos por el agua. Aspectos metodológicos a nivel de cuenca.  
[http://fich.unl.edu.ar/CISDAV/upload/Ponencias\\_y\\_Posters/Eje06/Zanuccoli\\_Moscoloni\\_Portapila/Zanuccoli,%20Moscoloni,%20Portapila.pdf](http://fich.unl.edu.ar/CISDAV/upload/Ponencias_y_Posters/Eje06/Zanuccoli_Moscoloni_Portapila/Zanuccoli,%20Moscoloni,%20Portapila.pdf)